

# Evaluierung von Methoden zum Erstellen und Aktualisieren von sicherheitskritischen Flughafendatenbanken nach RTCA Do-272a

Vom Fachbereich Maschinenbau  
an der Technischen Universität Darmstadt

zur

Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte

D i s s e r t a t i o n

vorgelegt von

**Dipl.-Geogr. Axel Friedrich**

aus Erbach, Odenwald

Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. W. Kubbat
Mitberichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. M. Becker
	Prof. Dr.-Ing. U. Klingauf
Tag der Einreichung:	26. August 2008
Tag der mündlichen Prüfung:	25.11.2008

D 17

Darmstadt 2008



## Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand am Fachgebiet Flugsysteme und Regelungstechnik der Technischen Universität Darmstadt unter der Leitung von Prof. Kubbat. Sie wäre ohne die breite Unterstützung und Hilfe von den folgenden Personen, Instituten und Gesellschaften nicht zustande gekommen:

An erster Stelle sei Herrn Professor Wolfgang Kubbat gedankt für die Betreuung meiner Arbeit sowie dem kreativen und kritischen Input bzgl. meiner thematischen Fragestellung. Für die Übernahme des Koreferats möchte ich auch Herrn Professor Becker vom Institut für Physikalische Geodäsie der TU-Darmstadt herzlich danken. Ebenso möchte ich mich bei Professor Klingauf vom Institut für Flugsysteme und Regelungstechnik der TU-Darmstadt für die Betreuung meiner Arbeit bedanken.

Bei allen ehemaligen Kollegen des FSR, insbesondere den Kollegen des Datenbankteams möchte ich mich für die jahrelange gemeinsame Forschungstätigkeit auf dem Gebiet von Flughafendatenbanken bedanken. Teile der gemeinsamen Arbeit flossen in diese Dissertation mit ein. Für die Umsetzung der Untersuchung zur Genauigkeit von Aerodrome-Charts ICAO, der Auswertung von NOTAM-Information, der Untersuchung zur automatischen Change-Detection und des Wolkenbedeckungsgrades sei insbesondere Maresa Liebram, Andreas Paul und Thomas Wildmann gedankt.

Die Erich-Becker Stiftung der Fraport AG trug mit einem Stipendium maßgeblich zur Umsetzung dieser Arbeit bei.

Ferner möchte ich mich bei der Fraport AG für die Bereitstellung von Information und Daten bedanken; insbesondere bei Herrn Konetzki und Frau Winter für die Bereitstellung von Extrakten der graphischen Datenbank der FRAPORT sowie Frau Birkner für die Erläuterung des NOTAM-Flusses am Flughafen Frankfurt.

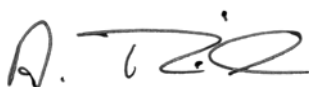
Die Firma Jeppesen hat durch ihre Forschungsaufträge im Rahmen des NASA Aviation Safety Programs die Untersuchungen zur Erstellung von Flughafendatenbanken gefördert und die Mitarbeit im Rahmen des RTCA SC-193 erst ermöglicht.

Meinen Eltern möchte ich dafür danken, dass sie mich während der gesamten Umsetzungszeit fortwährend motiviert und unterstützt haben.

Ebenso sei allen denen ein Dankeschön ausgesprochen, die nicht namentlich Erwähnung fanden, aber zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Ich versichere an Eides statt, dass ich diese Arbeit mit Ausnahme der ausdrücklich erwähnten Hilfen selbständig durchgeführt habe.

Memphis, Tennessee, den 21.12.2008





***für lilian und margaux***



## Übersicht

Die Bedeutung der Nutzung von Daten zur Flugführung nahm im Laufe der Evolution von Flugnavigations- und Flugsicherungsverfahren stetig zu. Kommerziell operierende Flugzeuge werden heute weitgehend durch Flightmanagementcomputer gesteuert, welche auf gespeicherte Daten von Wegpunkten und Luftfahrtstrassen zugreifen. Der Luftfahrtstandard RTCA Do-200a beschreibt einen Lebenszyklus von Daten zur Flugführung durch eine Datenkette mit den Gliedern Datenerstellung, Datenaufbereitung, Anwendungsintegration und Anwendung. Hierbei nimmt die Datenerstellung eine Sonderrolle innerhalb der Luftfahrt Datenkette ein, da sie die Genauigkeit und Vollständigkeit von Daten steuert.

Runway-Incursion-Vorfälle sowie Rollzeiten auf den Flughäfen haben in den letzten Jahren deutlich zugenommen. Verschiedene Systeme, die boden- oder cockpitseitig genutzt werden (z.B. A380 OANS - Onboard Airport Navigation System), sollen durch erhöhtes Situationsbewusstsein der Piloten und Lotsen einen effizienteren und sichereren Rollvorgang gewährleisten. Zur Nutzung dieser Systeme werden detaillierte, hochgenaue räumliche Daten des Flughafenlayouts sowie Informationen bezüglich lokalen operationellen Besonderheiten benötigt. Inhalt, Struktur und Datenqualität dieser so genannten Flughafendatenbanken wurden in Rahmen des Luftfahrtstandard RTCA Do-272a veröffentlicht. Da Untersuchungen am Institut für Flugsysteme und Regelungstechnik der TU-Darmstadt zeigten, dass die von nationalen zivilen Luftfahrtbehörden gegenwärtig veröffentlichten Flughafenkarten und Flugplatzrollkarten die im Rahmen von RTCA Do-272a definierten Anforderungen von Flughafendatenbanken nicht erfüllen, müssen alternative Quellen zum Erzeugen von Flughafendatenbanken ermittelt werden. Bedingt durch die hohe Dynamik des Flughafenumfeldes veraltet Information sehr schnell. Daher muss bei der Definition eines Lebenszyklus für Flughafendatenbanken zusätzlich zur Datenerstellung auch Verfahren zur Aktualisierung berücksichtigt werden, um die benötigte Datenqualität garantieren zu können.

Ziel der Dissertation ist die Definition eines Luftfahrt Daten-Lebenszyklus für Flughafendatenbanken zur Nutzung in sicherheitskritischen Flugführungsanwendungen nach den Vorgaben von RTCA Do-272a und RTCA Do-200a unter besonderer Berücksichtigung der Sonderrolle der Datenerstellung.

Im Rahmen der Arbeit wird zunächst die Notwendigkeit von Flughafendatenbanken zur effizienteren und sichereren Rollführung ausgearbeitet. Zum Ermitteln und Evaluieren von Datenanforderungen für Flughafendatenbanken werden zunächst Definitionen der Datenqualitätsanforderungen überprüft und einheitliche Definitionen erarbeitet. Im Kernteil der Arbeit wird die Ausprägung der im Rahmen von RTCA Do-272a definierten Datenanforderungen für Flughafendatenbanken hergeleitet und verschiedene Verfahren zum Erstellen und Aktualisieren von Flughafendatenbanken in Hinsicht auf die definierten Datenanforderungen evaluiert. Hierbei werden verschiedene Verfahren zur Datenneuerstellung mittels Methoden der Fernerkundung (chemo-optisch, elektro-optisch, Synthetic Aperture Radar, Laserscanning) und Methoden der bodengestützten Vermessung (GPS und Tachymetrie) als auch die Nutzung bereits existierender Daten der Luftfahrtbehörden (Aeronautical Information Publication) und der Flughafenbetreiber bezüglich ihrer Verfügbarkeit, der Vollständigkeit und der Positionsgenauigkeit untersucht und auf ihre Nutzbarkeit zur Erzeugung und Aktualisierung von Flughafendatenbanken gemäß des Standards RTCA Do-272a als auch unter Berücksichtigung wirtschaftlicher Aspekte bewertet. Um global gültige Aussagen treffen zu können, wurde die Bewertung der einzelnen Verfahren und Daten exemplarisch für die Flughäfen Frankfurt, Hamburg, Toulouse, Paris, Reno (Nevada), Addis Abbeba sowie Juneau (Alaska) durchgeführt. Zusätzlich wurden die in einer Umfrage zur Verfügbarkeit und Datenqualität von räumlichen Daten für 100 Flughäfen weltweit erhobene Information analysiert.

Das Ergebniss zeigt, dass lediglich flugzeuggestützte chemo- und elektro-optische Sensorsysteme und ein einziger höchstauflösender satellitengestützter elektro-optischer Sensor sowie bodengestützte Vermessungsmethoden gegenwärtig sowohl die Anforderung

an Vollständigkeit als auch an Positionsgenauigkeit erfüllen. Zur Aktualisierung der Flughafendatenbanken existiert zum heutigen Zeitpunkt kein Verfahren, welches die Anforderungen nach RTCA Do-272a zum Sicherstellen der Aktualität erfüllt. Hierbei werden insbesondere die Anforderung an rechtzeitige Verfügbarkeit, inhaltliche Vollständigkeit und Positionsgenauigkeit der Änderungsinformation nicht erreicht bzw. konnte im Fall von Information des Flughafenbetreibers mangels verfügbarer Information nicht evaluiert werden.

Unter Berücksichtigung der Ergebnisse der Evaluierung wurde abschliessend ein exemplarischer Lebenszyklus für Flughafendatenbanken basierend auf den Luftfahrtstandards RTCA Do-200a und Do-272a erarbeitet.



## **Abstract**

*Evaluation of generation and update methods for safety-critical Aerodrome Mapping Databases according to RTCA Do-272a”*

The use of digital data for flight guidance has increased steadily in the evolution of air navigation and air traffic control procedures. To a large extent, commercially operated aircrafts are piloted by Flight Management Computers that access an onboard stored digital representation of waypoints and airways. According to the aeronautical standard of RTCA Do-200a the lifecycle of digital data for flight guidance is represented by an aeronautical data chain. It consists of four individual links: data generation, data preparation, application integration and application usage. The data generation takes a significant role within the aeronautical data chain since it controls accuracy and completeness of data.

Runway-Incursion incidents as well as taxiing times at aerodromes have increased considerably within the last few years. In order to address the issue, multiple systems which are used both on the ground and in the cockpit (e.g. A380 OANS - onboard aerodrome navigation system) have been developed to ensure a more efficient and safer taxiing process by increasing situational awareness of pilots and controllers. To use these detailed systems, highly accurate spatial data of the aerodrome layout as well as operational significant non-spatial information is required. The aeronautical standard RTCA Do-272a defines content, structure and data quality of the so-called aerodrome mapping databases. Investigations at the institute of Flight Mechanics and Control at TU-Darmstadt stressed that aerodrome charts and aerodrome taxiing charts published by civil aviation authorities currently do not fulfill the content and data quality requirements for aerodrome mapping databases as stated within RTCA Do-272a. Thus, alternative data sources for the generation of aerodrome mapping databases had to be investigated. Due to the high dynamics of the aerodrome environment, information becomes out dated quickly. Consequently, in the scope of the definition of a life cycle for aerodrome databases both data generation as well as data update has to be considered in order to guarantee the required data quality.

The goal of this thesis is the definition of an aeronautical data life cycle for aerodrome mapping databases to be used within safety critical flight guidance applications, based on the requirements of RTCA Do-272a and RTCA Do-200a and taking under consideration the special role of the data generation.

Initially it demonstrates why aerodrome mapping databases are required to increase the efficiency and safety of the taxiing operation. In order to investigate and evaluate data requirements for aerodrome mapping databases, the required data quality has been determined and uniform definitions worked out. Within the main body of the work the numerical instances of data quality requirements are determined based on RTCA Do-272a and depending on data and methods that will be evaluated. Subsequently, it is determined whether different data and methods fulfill the determined data quality: Aerodrome mapping database generation methods by means of remote sensing (chemo-optical, electro-optical, Synthetic Aperture Radar, laser scanning) and ground based surveying methods (GPS and Tachymetry) are evaluated in terms of fulfilling the determined requirements for data completeness, accuracy and usability for updating purposes. In addition, the use of existing data from aerodrome authorities and national aviation authorities (Aeronautical Information Publications) are evaluated as well for the same terms. The availability of different methods and data as well as the required effort has been investigated for future industrial use. In order to meet globally valid statements the assessment of the individual methods and data has been conducted exemplarily for the aerodromes of Frankfurt, Hamburg, Toulouse, Paris, Reno (Nevada), Addis Abbaba as well as Juneau (Alaska). In addition a survey on the availability and data quality of spatial data for 100 aerodromes worldwide has been conducted and findings analyzed.

Results show that only aircraft based chemo-optical and electrical optical means of remote sensing, a single satellite based electrical optical sensor system with high spatial resolution and ground based surveying methods currently meet the completeness and accuracy requirements of RTCA Do-272a. Results also show at present neither method nor data exists which may be used for updating purposes of aerodrome mapping databases. Particularly the requirement of punctual availability, completeness and accuracy of changed information has not been met. Existing data from aerodrome authorities could not be evaluated due to lack of available information.

Finally, taking into consideration the results of the evaluation, an exemplary life cycle has been established for aerodrome mapping databases based on the aeronautical standards RTCA Do-200a and Do-272a.

## I. Inhaltsverzeichnis

I.	Inhaltsverzeichnis	V
II.	Abbildungsverzeichnis	XV
III.	Tabellenverzeichnis	XXIII
IV.	Definitionsverzeichnis	XXIX
V.	Formelverzeichnis	XXIX
VI.	Verzeichnis der Abkürzungen	XXXI
1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Ziel	2
1.3	Aufbau	3
2	Die Nutzung von digitalen Daten zur Flugführung	5
2.1	Evolution der Flugnavigation und des Air Traffic Management	7
2.2	Auf räumlichen Daten basierende Avioniksysteme	13
3	Herleitung der Notwendigkeit von Qualitätsmanagement für sicherheitskritische Luftfahrtdaten	21
3.1	Evolution des Qualitätsmanagements für Luftfahrtdaten	21
3.2	Die Luftfahrtdatenkette nach RTCA Do-200a	23
3.3	Status Quo der Datenqualität aeronautischer Daten	27
3.4	Fazit	31
4	Rahmenparameter zur Entwicklung von Qualitätssicherungsmaßnahmen für Luftfahrtdatenketten	33
4.1	Definition der Anwendung und der benötigten Dateninhalte	35
4.2	Analyse zur Definition der Parameter zum Beschreiben der Datenqualität	37
4.3	Definition der benötigten Datenqualität	45
4.4	Beschreibung eines standardisierten Austauschformates	53
4.5	Verantwortung zum Gewährleisten der Datenqualität	54
5	Herleitung der Notwendigkeit von Flughafendatenbanken	57
5.1	Gefahrenfaktoren von Rolloperationen	57
5.2	Ökonomische Faktoren von Rolloperationen	61

5.3	Avioniksysteme zur Erhöhung der Sicherheit und Effizienz von Rolloperationen	63
6	Definition von Datenanforderungen an Flughafendatenbanken	71
6.1	Definition der Anwendungen	71
6.2	Definition der Dateninhalte	72
6.3	Definition der benötigten Datenqualität	74
6.4	Beschreibung eines standardisierten Austauschformates	81
7	Evaluierung von Methoden zur Datenerstellung von Flughafendatenbanken	85
7.1	Eingrenzung der Untersuchungen	86
7.2	Vorgehensweise	91
7.3	Grundlagen	94
8	Evaluierung von Datenerstellungsmethoden: Fernerkundung	97
8.1	Einführung in die Fernerkundung	97
8.2	Sensorsysteme	103
8.3	Nutzung von Sensorsystemen in der weiteren Untersuchung	129
8.4	Analyse der Vollständigkeit	131
8.5	Analyse der Positionsgenauigkeit	183
8.6	Analyse der Verfügbarkeit sowie Aufwandsabschätzung	237
8.7	Zusammenfassung und Beurteilung der Ergebnisse: Erzeugen von Flughafendatenbanken mittels Methoden der Fernerkundung	251
9	Evaluierung von Datenerstellungsmethoden: Bodengestützte Vermessungsmethoden	263
9.1	Tachymetrie	265
9.2	GPS	269
9.3	Analyse der Vollständigkeit	283
9.4	Analyse der Positionsgenauigkeit	289
9.5	Analyse der Verfügbarkeit sowie Aufwandsabschätzung	303
9.6	Zusammenfassung und Beurteilung der Ergebnisse: Erzeugen von Flughafendatenbanken mittels bodengestützten Vermessungsmethoden	311
10	Evaluierung der Nutzung existierender Daten: Aerodrome/Heliport Chart -ICAO (AIP)	317
10.1	Arbeitsablauf zum Erstellen von Flughafendatenbanken mittels Aerodrome/Heliport Chart -ICAO	321
10.2	Vorgehensweise	327
10.3	Verfügbarkeit	331
10.4	Analyse der Vollständigkeit	335
10.5	Analyse der Positionsgenauigkeit	347

10.6	Aufwandsabschätzung	367
10.7	Zusammenfassung und Beurteilung der Ergebnisse: Erzeugen von Flughafendatenbanken mittels Aerodrome/Heliport Chart -ICAO (AIP)	369
11	Evaluierung der Nutzung existierender Daten: Karten und graphische Datenbanken des Flughafenbetreibers	373
11.1	Arbeitsablauf zum Erstellen von Flughafendatenbanken basierend auf Karten und graphischen Datenbanken des Flughafenbetreibers	375
11.2	Vorgehensweise	377
11.3	Verfügbarkeit	379
11.4	Analyse der Vollständigkeit	383
11.5	Analyse der Positionsgenauigkeit	389
11.6	Aufwandsabschätzung	393
11.7	Zusammenfassung und Beurteilung der Ergebnisse: Erzeugen von Flughafendatenbanken basierend auf Karten und graphischen Datenbanken des Flughafenbetreibers	397
12	Empfehlung zur Wahl eines Verfahrens zum Erzeugen von Flughafendatenbanken nach RTCA Do-272a	401
13	Evaluierung von Methoden zum Sicherstellen der Aktualität von Flughafendatenbanken	409
13.1	Methoden zur Change Detection und Change Acquisition	413
13.2	Umfang der Untersuchung	423
13.3	Evaluierung der Nutzbarkeit von Information zur Change Detection	425
13.4	Evaluierung der Nutzbarkeit von Information zur Change Acquisition	443
13.5	Aufzeigen eines Verfahrens zum Sicherstellen der Aktualität von Flughafendatenbanken	457
14	Integration der Verfahren zur Datenerstellung und Aktualisierung von Flughafendatenbanken in eine Luftfahrt Datenkette	459
15	Zusammenfassung	463
16	Ausblick	477
17	Literatur	479
Appendix A.	Übersicht der untersuchten Definitionen zur Datenqualität	493
Appendix B.	Erforderliche Information für Flughafendatenbanken nach Do-272a	503
Appendix C.	Tabellen zur Falluntersuchung Positionsgenauigkeit Aerodrome/Heliport Charts - ICAO	517

Appendix D. Umfrage zu Karten und graphischen Datenbanken des Flughafenbetreibers	519
Appendix E. NOTAM-Analyse	535

## II. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	A380 OANS (Onboard Airport Navigation System) .....	1
Abbildung 2:	Aufbau der Arbeit .....	4
Abbildung 3:	Entwicklung der weltweiten Flugbewegungen (Departures) sowie Flugstunden (Flight Hours) im Zeitraum von 1965 bis 2003 .....	5
Abbildung 4:	Anflugkarte für <i>Non-Precision-Approach</i> Frankfurt (EDDF VOR DME RWY 25R): .....	8
Abbildung 5:	Streckendifferenz von 18% zwischen VOR/NDB basierter Route und RNAV- Route auf der Strecke Belgrade-Haines. ....	9
Abbildung 6:	RNAV Flugprofil .....	9
Abbildung 7:	RNP-Konzept .....	11
Abbildung 8:	RNP-0.15 Anflug auf Runway 26 Juneau, Alaska .....	12
Abbildung 9:	Komponenten von auf aeronautischen Daten basierenden Avioniksystemen .....	13
Abbildung 10:	SVS Flugführungsanzeigen .....	14
Abbildung 11:	Komponenten eines <i>Flight Management Systems</i> (FMS) .....	15
Abbildung 12:	PFD und ND des Airbus 320 .....	15
Abbildung 13:	Inhalt einer <i>Onboard</i> -Navigationsdatenbank .....	16
Abbildung 14:	Visuelle TAWS-Warnung beim simulierten Abflug von Salzburg mit Darstellung des umgebenden Geländes, basierend auf einer Gelände- und Hindernisdatenbank .....	17
Abbildung 15:	Gelände- und Hindernisdatenbank zur Nutzung in einem TAWS .....	18
Abbildung 16:	TAWS mit unterlegtem VSD beim simulierten Anflug auf Mt. Rainier .....	18
Abbildung 17:	Datenzyklus FMS <i>Onboard</i> -Navigationsdatenbank .....	22
Abbildung 18:	Kettenglieder einer Luftfahrt-Datenkette .....	24
Abbildung 19:	Luftfahrt-Datenkette, Baumtyp .....	25
Abbildung 20:	Datenaufbereitung mit Qualitätssicherungsmaßnahmen .....	26
Abbildung 21:	Verantwortungen zur Definition der Variablen einer Luftfahrt-Datenkette .....	34
Abbildung 22:	Definition von Datenanforderungen bzw. eines Datenstandards und dessen Umsetzung in der Luftfahrt-Datenkette .....	35
Abbildung 23:	Auswirkungen verschiedener Vertrauensintervalle bei der Angabe von Positionsgenauigkeiten .....	37
Abbildung 24:	RNP Tunnel-Konzept .....	46
Abbildung 25:	Risiko Analyse für eine Rollführungsanzeige nach dem RNP-Konzept .....	48
Abbildung 26:	Berechnung des Total System Errors (TSE) einer Rollführungsfunktion .....	50
Abbildung 27:	Datenfehler als Komponente des Total System Errors (TSE) .....	50
Abbildung 28:	Definition von Austauschformaten .....	54
Abbildung 29:	Verantwortung zur Umsetzung von definierten Datenqualitätsanforderungen .....	56

Abbildung 30:	Runway Incursions U.S.A. 2002 – 2004 .....	58
Abbildung 31:	Rollweg von Flug SQ006 am 31. Oktober 2000 .....	59
Abbildung 32:	Sequenz der Ereignisse auf dem Flughafen Milan-Linate Airport am 8. Oktober 2001 .....	60
Abbildung 33:	Roll- und Startweg auf dem Lexington Bluegrass Flughafen .....	61
Abbildung 34:	Entwicklung der durchschnittlichen Rollzeit 1995 – 1998 am Flughafen Chicago O'Hare .....	62
Abbildung 35:	Flughafenkarte Reno (Papier) Flughafenkarte Reno, exemplarische digitale Darstellung .....	64
Abbildung 36:	Komponenten von A-SMGCS .....	66
Abbildung 37:	<i>Aerodrome Movement Area Safety System (AMASS)</i> .....	67
Abbildung 38:	Cockpit Display of Traffic Information (CDTI) mit Überlagerung von Eigenposition und Position von Fremdflugzeugen auf einer Flughafendatenbank .....	67
Abbildung 39:	NASA Runway Incursion Prevention System (RIPS) .....	68
Abbildung 40:	<i>Rollführungsanzeige</i> .....	68
Abbildung 41:	<i>Hold-Short-Anweisung für Landebahnen mit Land-and-Hold-Short Operations.</i> .....	69
Abbildung 42:	<i>NASA Takeoff Performance Monitoring System (TOPMS)</i> .....	70
Abbildung 43:	Ausschnitt des Datenmodells für Flughafendaten (Runway-Feature Types) in einer UML-Darstellung .....	82
Abbildung 44:	Ausschnitt des Metadatenmodells für Flughafendatenbanken in einer UML-Darstellung .....	83
Abbildung 45:	Datentransfer mittels standardisierten Austauschformaten oder individuellen Austauschformaten .....	84
Abbildung 46:	Luftfahrtketten für Flughafendatenbanken unterschieden nach Datenqualitätskategorie .....	85
Abbildung 47:	Einschränkungen der Evaluierung .....	89
Abbildung 48:	Vorgehensweise zur Evaluierung von Methoden zur Datenerstellung von Flughafendatenbanken .....	93
Abbildung 49:	Elektromagnetisches Spektrum .....	98
Abbildung 50:	Solare Strahlungskurve am Außenrand der Atmosphäre und am Erdboden .....	99
Abbildung 51:	Informationsgehalt bei verschiedener radiometrischer Auflösung .....	100
Abbildung 52:	Beispiel verschiedener räumlicher Auflösung .....	101
Abbildung 53:	Komponenten eines chemo-optischen Sensors und Sensorplattform .....	104
Abbildung 54:	Datenprodukte chemo-optischer Sensoren .....	104
Abbildung 55:	Reliefverschiebung .....	105
Abbildung 56:	Streifen- und Blockbefliegung .....	107
Abbildung 57:	Verteilung von Vollpasspunkten (GCPs) im Streifenmodell für die Flughafendatenbank EDMA (Augsburg) .....	108
Abbildung 58:	Signalisierter GCP und Einmessung eines natürlichen GCPs auf dem Flughafen Reno, Nevada .....	108



Abbildung 59:	Herstellen der äußeren Orientierung .....	109
Abbildung 60:	Bündelblockausgleichung .....	110
Abbildung 61:	Ableiten eines Orthobilds aus einem Luftbild und einem Geländemodell .....	111
Abbildung 62:	Satellitengestützter, elektro-optischer Fernerkundungssensor Quickbird 2.....	112
Abbildung 63:	Datenprodukte elektro-optische Fernerkundungssysteme .....	113
Abbildung 64:	Reliefverschiebung in der Zentralperspektive und bei einem Zeilenscanner .....	114
Abbildung 65:	Radarprinzip.....	118
Abbildung 66:	Schematische Darstellung einer Radaraufnahme .....	119
Abbildung 67:	Radarsat Synthetic-Aperture-Radar Sensor .....	120
Abbildung 68:	Datenprodukte Synthetic-Aperture-Radar (SAR).....	120
Abbildung 69:	Auswirkungen des Geländereiefs auf Radarbilder.....	121
Abbildung 70:	Optech ALTM -33 kHz LIDAR-System.....	125
Abbildung 71:	Datenprodukte LIDAR.....	125
Abbildung 72:	LIDAR-Höhenmodell Flughafen Gainesville Regional Airport.....	126
Abbildung 73:	Verschiedene LIDAR-Verfahren: Rotierender Spiegel, nebeneinanderliegende Laserdioden und kippender Spiegel.....	127
Abbildung 74:	Verschmutzungserscheinungen und Abweichungen von der ICAO-Norm .....	131
Abbildung 75:	Extrahieren von Objekten in einer Fernerkundungsszene.....	132
Abbildung 76:	Vorgehensweise zur Evaluierung der Vollständigkeit für Fernerkundungssensoren .....	134
Abbildung 77:	Lokale radiometrische Anpassung zum Sichtbarmachen von „verstecktem“ Informationsgehalt.....	136
Abbildung 78:	Darstellung einer Fernerkundungsszene des sichtbaren Spektral- bereiches als Farbbild bei verschiedener radiometrische Auflösung.....	137
Abbildung 79:	Abbildung eines Blastpads mit Markierung im LIDAR-Intensitätsbild, Luftbild und SAR-Intensitätsbild (Flughafen Reno).....	138
Abbildung 80:	Fehlidentifizierung von Stopbars bei Nutzung von panchromatischen Bildern. Flughafen Boeing Fields KBFI.....	141
Abbildung 81:	Fehlidentifizierung von Rollführungslinien bei Nutzung von panchromatischen Bildern. Flughafen Boeing Fields KBFI.....	142
Abbildung 82:	Abbildung eines spektral dominanten Objekts in einer Mischpixelabbildung.....	143
Abbildung 83:	Abbildung von Rollführungslinien bei verschiedenen räumlichen Auflösungen .....	146
Abbildung 84:	Größenverhältnisse von verschiedenen <i>Vertical Point Objects</i> . Darstellung im Massstab 1:200.....	147
Abbildung 85:	Abbildung eines Windsacks bei verschiedenen räumlichen Auflösungen .....	148

Abbildung 86:	Abbildung einer (Runway) Painted Centerline Markierung bei verschiedenen räumlichen Auflösungen .....	149
Abbildung 87:	Genormte Linienabbildung zum Ableiten der optischen Auflösung der USAF 1951 .....	154
Abbildung 88:	Falluntersuchung Tiefbefliegung Flughafen Frankfurt: Spektrale Auflösung .....	156
Abbildung 89:	Falluntersuchung Tiefbefliegung Flughafen Frankfurt: Radiometrische Auflösung .....	157
Abbildung 90:	Falluntersuchung Tiefbefliegung Flughafen Frankfurt: Räumliche Auflösung .....	157
Abbildung 91:	Beispiele spektraler Auflösung elektro-optischer Sensoren.....	159
Abbildung 92:	Kombination von 3 Rot-, Grün-, und Blaukanälen zu einem Echtfarbenbild .....	159
Abbildung 93:	Verzerrung eines Bodensegments mit zunehmendem Abstand vom Nadir bei einem Zeilenscanner .....	161
Abbildung 94:	Ausschnitt Flughafen Frankfurt im IKONOS II pansharpnd Echtfarbenbild.....	162
Abbildung 95:	Falluntersuchung IKONOS-2: Spektrale Auflösung .....	162
Abbildung 96:	Falluntersuchung IKONOS-2: Radiometrische Auflösung .....	163
Abbildung 97:	Falluntersuchung IKONOS-2: Räumliche Auflösung .....	163
Abbildung 98:	Falluntersuchung Quickbird-2: Räumliche Auflösung .....	164
Abbildung 99:	Reflexion von Mikrowellen an Oberflächen verschiedener Rauigkeit. ....	168
Abbildung 100:	SAR-Bild aus der ägyptischen Wüste mit Abbildung von metallischen, elektrischen Oberleitungen .....	168
Abbildung 101:	Falluntersuchung Intermap STAR 3i IFSAR: Abbildung von Landebahn und Rollwegen im Radar-Intensitätsbild und im Referenzbild.....	170
Abbildung 102:	Falluntersuchung Intermap STAR 3i IFSAR: Abbildung eines Blastpads mit Markierung im Radar-Intensitätsbild und im Referenzbild.....	170
Abbildung 103:	Falluntersuchung Intermap STAR 3i IFSAR: Abbildung eines Windsacks im SAR-Intensitätsbild und im Referenzbild .....	171
Abbildung 104:	Abbildung einer Landebahn im Laser-Intensitätsbild .....	173
Abbildung 105:	Falluntersuchung Optech ALTM 33KHz LIDAR.....	174
Abbildung 106:	Falluntersuchung Optech ALTM 2050: Detailausschnitt Gainesville Regional Airport .....	175
Abbildung 107:	Falluntersuchung Optech ALTM 2050: LIDAR Intensitätsbild Flughafen Reno, aufgenommen in 1200m Flughöhe.....	175
Abbildung 108:	Falluntersuchung Optech ALTM 2050: LIDAR Intensitätsbild Flughafen Reno und Referenzbild .....	176
Abbildung 109:	Vorgehensweise zur Evaluierung der Positionsgenauigkeit von Fernerkundungssensoren .....	184
Abbildung 110:	Induzierter Positionsfehler bei der Vektorextraktion von Kreissegmenten durch Liniensegmente aus einem Fernerkundungsbild .....	186

Abbildung 111:	Signalisierter GCP für Luftbildbefliegung.....	191
Abbildung 112:	Aufnahme von natürlichen Kontrollpunkten auf dem Flughafen mittels D-GPS. ....	191
Abbildung 113:	Nutzung von Bildstreifen oder Bildblöcken zur Abdeckung von Flughäfen verschiedener Grösse und mit verschieden angeordneten Landebahnsystemen.....	193
Abbildung 114:	Genauigkeit der Streifentriangulation im Vergleich zu der des Einzelmodells.....	195
Abbildung 115:	Verteilung der GCPs und Kontrollpunkte Photogrammetrieprojekt Flughafen Stuttgart .....	201
Abbildung 116:	Verteilung der GCPs Photogrammetrieprojekt Flughafen Hamburg.....	202
Abbildung 117:	Verteilung der GCPs im Photogrammetrieprojekt Flughafen Augsburg ....	203
Abbildung 118:	Mittlerer Positionsfehler und CE 95 der Checkpoints in den untersuchten Photogrammetrieprojekten.....	204
Abbildung 119:	Ideale Verteilung von GCPs bei verschiedenen Flughafen-Layouts.....	207
Abbildung 120:	Verifizierung der Positionsgenauigkeit der Fernerkundungsszene durch per D-GPS eingemessene natürliche GCPs.....	218
Abbildung 121:	Überlagerung von Elementen der Flughafendatenbank Reno, Nevada auf das Intermap Star 3i ORI-Intensitätsbild.....	228
Abbildung 122:	Erreichbare Positionsgenauigkeit der Georeferenzierung der untersuchten Fernerkundungssensoren im Vergleich .....	235
Abbildung 123:	Jahresmittel und mittlerer jährlicher Bedeckungsgrad der weltweit grössten Flughäfen .....	241
Abbildung 124:	Geometrische Verknüpfung von Einzelpunktmessungen zur Abbildung von linien- bzw. flächenhaften Objekten .....	263
Abbildung 125:	Einbinden von Neupunkten in ein geodätisches Netzwerk durch polare Anbindung.....	264
Abbildung 126:	SACS in Juneau, AK.....	264
Abbildung 127:	Totalstation und Reflektor .....	266
Abbildung 128:	2-dimensionale Punktbestimmung mittels Polarkoordinaten .....	266
Abbildung 129:	Bestimmung der Höhe mittels Höhenwinkelmessung.....	267
Abbildung 130:	Dokumentation der tachymetrischen Vermessung eines Neupunktes .....	268
Abbildung 131:	Mobile GIS Solution ESRI ArcPad .....	269
Abbildung 132:	Struktur des GPS Signals .....	271
Abbildung 133:	GPS Navigationslösung .....	273
Abbildung 134:	D-GPS Empfänger von Leica und Trimble.....	276
Abbildung 135:	Differential GPS Positionierung im statischen Modus ( <i>Static</i> und <i>Rapid Static</i> ) .....	277
Abbildung 136:	Differential GPS Positionierung im Echtzeitmodus (RT-DGPS) .....	278
Abbildung 137:	Arbeitsablauf DGPS Vermessung (Positionslösung) für Flughafenobjekte .....	280
Abbildung 138:	Dynamische Aufnahme von Neupunkten mittels auf Fahrzeug montierter GPS-Antenne.....	281

Abbildung 139:	Vorgehensweise zur Evaluierung der Vollständigkeit für bodengestützte Vermessungsmethoden .....	283
Abbildung 140:	Aufnahme von Runwayobjekten, Runway-Centerlineobjekten und Taxi-Guidanceline Objekten durch Einzelpunktmessungen in Reno, Nevada .....	286
Abbildung 141:	Vorgehensweise zur Evaluierung der Positionsgenauigkeit für bodengestützte Vermessungsmethoden .....	290
Abbildung 142:	Erreichbare Positionsgenauigkeiten der Einzelpunktmessungen mit GPS.....	295
Abbildung 143:	Vergleich der absoluten Positionsgenauigkeit von Flughafenobjekten bei der Einmessung durch bodengestützte Vermessungsmethoden.....	301
Abbildung 144:	Beispielkarte Aerodrome/Heliport Chart - ICAO .....	319
Abbildung 145:	Beispiele für das kartographische Ersetzen von realen Objekten durch Symbole .....	320
Abbildung 146:	Calcomp Digitalisiertisch Surface-Lit AccuTab und On-Screen-Digitizing.....	322
Abbildung 147:	Arbeitsschritte zum Vektorisieren von Flughafendatenbankobjekten aus einer Aerodrome/Heliport Chart - ICAO .....	325
Abbildung 148:	Vorgehensweise zur Evaluierung der Nutzung von Aeronautical Information Publications (AIP) zum Erstellen von Flughafen-datenbanken nach RTCA Do-272a .....	328
Abbildung 149:	Überprüfen der Vollständigkeit durch Überlagerung vom Vektorobjekt <i>Runway</i> auf die Basiskarte am Bildschirm.....	335
Abbildung 150:	Auswirkungen von Massstab und damit verbundener Generalisierung auf die Darstellung eines Flughafens.....	338
Abbildung 151:	Vergleich der Darstellung von Gebäudegrundrissen in einer aus einem hochauflösendem Luftbild extrahierten Flughafendatenbank und in einer Flughafenkarte geringeren Maßstabs .....	350
Abbildung 152:	Mittlerer Positionsfehler und CE95 Positionsfehler von Runway-Elementen auf der georeferenzierten Aerodrome/Heliport Chart -ICAO bzw. Airport Diagram .....	359
Abbildung 153:	Mittlerer Positionsfehler und CE95 Positionsfehler von Taxiway -Elementen auf der georeferenzierten Aerodrome/Heliport Chart -ICAO bzw. Airport Diagram .....	361
Abbildung 154:	Mittlerer Positionsfehler und CE95 Positionsfehler von Vertical Polygon Objects auf der georeferenzierten Aerodrome/Heliport Chart -ICAO bzw. Airport Diagram.....	362
Abbildung 155:	Mittlerer Positionsfehler und CE95 Positionsfehler der georeferenzierten Aerodrome/Heliport Chart ICAO bzw. Airport Diagram .....	363
Abbildung 156:	Projizierter Rollweg eines Flugzeuges auf die georeferenzierten Aerodrome/Heliport Chart ICAO von Yaounde, Kamerun .....	364
Abbildung 157:	Ausschnitt graphische Datenbank Flughafen Boston-Logan (KBOS).....	373
Abbildung 158:	Vorgehensweise zur Evaluierung der Vollständigkeit für Karten und graphische Datenbanken des Flughafenbetreibers .....	378

Abbildung 159:	Verteilung der im Rahmen der Umfrage kontaktierten weltweit 100 größten Verkehrsflughäfen in Bezug auf Flugbewegungen.....	379
Abbildung 160:	Ausgang und Rücklauf der Umfrage zu Karten und graphischen Datenbanken von Flughafenbetreibern.....	380
Abbildung 161:	Formate von räumlichen Daten zum Infrastrukturmanagement und zur Unterstützung von Flugoperationen auf Flughäfen .....	381
Abbildung 162:	Verfügbarkeit von Karten und graphischen Datenbanken von Flughafenbetreibern.....	382
Abbildung 163:	Übersicht der untersuchten graphischen Datenbanken/Karten .....	385
Abbildung 164:	Evaluierung der Umfrageergebnisse zur Frage: „Positionsgenauigkeit von Karten und graphischen Datenbanken“ .....	391
Abbildung 165:	Vorgehensweise Aktualisierung von räumlichen Daten: Idealfall für Luftfahrtdatenketten .....	410
Abbildung 166:	Vorgehensweise Aktualisierung von räumlichen Daten: Schlechtester Fall für Luftfahrtdatenketten .....	410
Abbildung 167:	Visuelle Change Detection.....	413
Abbildung 168:	Pixelbasierte Change Detection zweier Fernerkundungsaufnahmen des Flughafens Frankfurt, Rollweg D.....	414
Abbildung 169:	Kommunikation der Beeinträchtigung des Rollverkehrs durch Bau eines Rollweges mittels NOTAM und AIP Supplement .....	415
Abbildung 170:	Visuelle Change Detection durch Übereinanderlegen von Vektorobjekten einer älteren und einer neueren graphischen Datenbank .....	416
Abbildung 171:	Automatische Change Detection basierend auf Vektorobjekten einer graphischen Datenbank des Flughafens Frankfurt.....	416
Abbildung 172:	Übersicht AIRAC-Zyklus .....	418
Abbildung 173:	Zeitlicher Verlauf der Integration von Änderungen innerhalb der Luftfahrtdatenkette am Beispiel FMS-Daten .....	419
Abbildung 174:	Szenarien der Lieferung von Änderungsinformation zum Gewährleisten der Aktualität von Flughafendatenbanken .....	420
Abbildung 175:	Zeitliche Anforderungen an Change Detection und Change Acquisition zur Änderungsintegration im Rahmen eines AIRAC-Zyklus....	421
Abbildung 176:	Vorgehensweise zur Evaluierung von Information zur Change Detection .....	426
Abbildung 177:	Aufnahme und Abbildung einer existierenden Änderung am Beispiel von Absperrungen auf dem Flughafen Reno, NV .....	427
Abbildung 178:	Kommunikation von Änderungen in Form von Planungsinformation vom Flughafenbetreiber zur Flugsicherheitsbehörde.....	428
Abbildung 179:	Informationsfluss zum Generieren von den Flughafen betreffenden NOTAMs in den USA.....	429
Abbildung 180:	Vorgehensweise zur Evaluierung von Daten und Methoden zur Change Acquisition.....	443
Abbildung 181:	Ergebnis der Umfrage zur Aktualisierung von Karten und graphischen Datenbanken von Flughafenbetreibern.....	449
Abbildung 182:	Mögliche Szenarien zur Change Acquisition .....	454

Abbildung 183:	Integration der Verfahren zur Datenerstellung und Aktualisierung von Flughafendatenbanken in eine Luftfahrt Datenkette.....	461
Abbildung 184:	Rangliste der weltweiten Flughäfen nach Flugbewegungen 1999, Rang 1 - 50 .....	519
Abbildung 185:	Rangliste der weltweiten Flughäfen nach Flugbewegungen 1999, Rang 51-100 .....	520
Abbildung 186:	Umfrage zu Karten und graphischen Datenbanken des Flughafenbetreibers. Anschrieben .....	522
Abbildung 187:	Umfrage zu Karten und graphischen Datenbanken des Flughafenbetreibers. Seite 1 .....	523
Abbildung 188:	Umfrage zu Karten und graphischen Datenbanken des Flughafenbetreibers. Seite 2 .....	524
Abbildung 189:	Umfrage zu Karten und graphischen Datenbanken des Flughafenbetreibers. Seite 3 .....	525
Abbildung 190:	Umfrage zu Karten und graphischen Datenbanken des Flughafenbetreibers. Seite 4 .....	526
Abbildung 191:	Umfrage zu Karten und graphischen Datenbanken des Flughafenbetreibers. Seite 5 .....	527
Abbildung 192:	Umfrage zu Karten und graphischen Datenbanken des Flughafenbetreibers. Seite 6 .....	528
Abbildung 193:	Umfrage zu Karten und graphischen Datenbanken des Flughafenbetreibers. Seite 7 .....	529
Abbildung 194:	Umfrage zu Karten und graphischen Datenbanken des Flughafenbetreibers. Seite 8 .....	530

### III. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Anwendungsklassen RTCA SC-193/EUROCAE WG44 .....	76
Tabelle 2:	Positionsgenauigkeitsanforderungen für die horizontale Komponente von Datenklassen einer Flughafendatenbank.....	78
Tabelle 3:	Integritätsanforderungen für Datenklassen einer Flughafendatenbank .....	79
Tabelle 4:	Auflösungsanforderungen für positionsbeschreibenden Elemente der Datenklassen einer Flughafendatenbank .....	80
Tabelle 5:	Anforderung verschiedener Anwendungen an Datenqualitäts-kategorien von Flughafendatenbanken und gegenwärtiger Nutzungsstand der Anwendung.....	87
Tabelle 6:	Inhalts- und horizontale Positionsgenauigkeitsanforderungen für Datenqualitätskategorie <i>Medium</i> nach Do-272a.....	90
Tabelle 7:	Vom Autor erstellte, verifizierte und aktualisierte Flughafendatenbanken .....	94
Tabelle 8:	Darstellung einer Auswahl an vom Autor erstellten Flughafendatenbanken .....	95
Tabelle 9:	Übersicht kommerzieller chemo-optischer Fernerkundungssysteme .....	111
Tabelle 10:	Übersicht kommerzieller elektro-optischer Fernerkundungssysteme .....	117
Tabelle 11:	Übersicht kommerzieller SAR-Fernerkundungssysteme .....	123
Tabelle 12:	Übersicht kommerzieller LIDAR-Fernerkundungssysteme .....	128
Tabelle 13:	Reflektivitäten eines 0.9 µm (Nahes Infrarot) LIDAR .....	139
Tabelle 14:	Anforderung an die radiometrische Auflösung von Fernerkundungssensoren .....	140
Tabelle 15:	Definierte minimale Ausdehnung für Objekte einer Flughafendatenbank..	145
Tabelle 16:	Auflösungsanforderungen an Fernerkundungssysteme zum Erfüllen der Vollständigkeit von Flughafendatenbanken .....	151
Tabelle 17:	Testfälle für die Evaluierung der Vollständigkeit von mittels Methoden der Fernerkundung erzeugten Flughafendatenbanken.....	152
Tabelle 18:	Optisches Auflösungsvermögen von Luftbildfilmen .....	155
Tabelle 19:	Übersicht chemo-optischer Fernerkundungssysteme.....	158
Tabelle 20:	Abgleich der Anforderungen mit Produktspezifikationen elektro-optischer Fernerkundungssysteme.....	165
Tabelle 21:	Radar-Frequenzbereiche .....	167
Tabelle 22:	Abgleich der Anforderungen mit Produktspezifikationen SAR-Fernerkundungssysteme .....	172
Tabelle 23:	Abgleich der Anforderungen mit Produktspezifikationen LIDAR-Fernerkundungssysteme .....	176
Tabelle 24:	Übersicht der Eignung der untersuchten Sensorsysteme bzgl. der Eignung zum Gewährleisten der Vollständigkeit von Flughafendatenbanken .....	181
Tabelle 25:	Definitionsgenauigkeit natürlicher GCPs .....	194

Tabelle 26:	Mittlerer und maximaler Gewichtseinheitenfehler für Berechnung der Positionsgenauigkeit im Bildblock; wenige GCPs.....	196
Tabelle 27:	Mittlerer und maximaler Gewichtseinheitenfehler für Genauigkeitsberechnung im Block; viele GCPs .....	196
Tabelle 28:	Erreichbare Positionsgenauigkeiten bei der Aerotriangulation unter Annahme von Standardparametern zur Aufnahme von Luftbildern zur Erstellung von Flughafendatenbanken .....	198
Tabelle 29:	Horizontaler Lagefehler der indirekten Georeferenzierung durch Aerotriangulation unter Annahme von Standardparametern zur Aufnahme von Luftbildern zur Erstellung von Flughafendatenbanken .....	199
Tabelle 30:	Abgleich der Anforderungen an Positionsgenauigkeit mit Produktspezifikationen elektro-optischer Fernerkundungssysteme.....	213
Tabelle 31:	Evaluierung der Anforderungen an Positionsgenauigkeit mittels publizierter wissenschaftlicher Ergebnisse zur Positionsgenauigkeit elektro-optischer Fernerkundungssysteme.....	216
Tabelle 32:	Evaluierung der Positionsgenauigkeit der Georeferenzierung von Quickbird-2 Custom Orthorectified-Szenen .....	219
Tabelle 33:	Evaluierung der Positionsgenauigkeit der Georeferenzierung von IKONOS II Standard Imagery Geometrically Corrected Szenen .....	220
Tabelle 34:	Evaluierung der Positionsgenauigkeit der Georeferenzierung von kommerziell verfügbaren HRSC-A - Szenen .....	221
Tabelle 35:	Übersicht der die Anforderungen an Positionsgenauigkeit erfüllenden elektro-optischen Fernerkundungssensoren.....	222
Tabelle 36:	Abgleich der Anforderungen an Positionsgenauigkeit mit Produktspezifikationen von SAR-Fernerkundungssystemen.....	226
Tabelle 37:	Evaluierung der Anforderungen an Positionsgenauigkeit mit publizierter wissenschaftlichen Ergebnissen zur Positionsgenauigkeit von SAR-Fernerkundungssystemen .....	227
Tabelle 38:	Evaluierung der Positionsgenauigkeit der Georeferenzierung von Star 3i.....	228
Tabelle 39:	Übersicht der die Anforderungen an Positionsgenauigkeit erfüllenden elektro-optischen Fernerkundungssensoren.....	229
Tabelle 40:	Abgleich der Anforderungen an Positionsgenauigkeit mit Produktspezifikationen von LIDAR-Fernerkundungssystemen.....	232
Tabelle 41:	Geschätzter Aufwand zum Erstellung von Flughafendatenbank-objekten aus chemo-optischen Luftbildern .....	239
Tabelle 42:	Geschätzter Aufwand zum Erstellung von Flughafendatenbank-objekten aus Aufzeichnungen elektro-optischer Sensoren.....	243
Tabelle 43:	Geschätzter Aufwand zum Erstellung von Flughafendatenbank-objekten aus SAR-Intensitätsaufzeichnungen .....	246
Tabelle 44:	Geschätzter Aufwand zum Erstellung von Flughafendatenbank-objekten aus LIDAR-Intensitätsaufzeichnungen .....	247
Tabelle 45:	Übersicht der räumlichen und zeitlichen Verfügbarkeit der untersuchten Fernerkundungssensorsysteme.....	249



Tabelle 46:	Vergleich von Aufwand und Kosten zum Aufwand zum Erstellen von Flughafendatenbankobjekten mittels verschiedenen Verfahren der Fernerkundung.....	249
Tabelle 47:	Auflösungsanforderungen an Fernerkundungssysteme zum Erfüllen der Vollständigkeit von Flughafendatenbanken.....	253
Tabelle 48:	Vor- und Nachteile der Nutzung der verschiedenen untersuchten Methoden der Fernerkundung zum Erstellen der Vektorobjekte von Flughafendatenbanken nach RTCA Do-272a.....	260
Tabelle 49:	Sensorsystem-spezifische Zusammenfassung der Ergebnisse bzgl. Vollständigkeit und horizontaler Positionsgenauigkeit.....	261
Tabelle 50:	Vom Autor durch bodengestützter Vermessungsmethoden erstellte bzw. aktualisierte Flughafendatenbanken .....	265
Tabelle 51:	GPS-Signale und Genauigkeiten der daraus ermittelten Entfernungen ....	272
Tabelle 52:	Geschätzter SPS C/A Code Entfernungshaushalt.....	294
Tabelle 53:	Abgleich der Positionsgenauigkeitsanforderungen mit Produktspezifikationen GPS der Kartographie- und Vermessungsklasse .....	297
Tabelle 54:	Genauigkeit der Einzelpunktmessung auf einer Distanz von 1000m von Theodoliten mit externen Entfernungsmessern sowie Tachymetern ..	300
Tabelle 55:	Aufwandsabschätzung GPS-gestützte Vermessung einer Flughafen-datenbank für Flughafen mittlerer Grösse .....	306
Tabelle 56:	Aufwandsabschätzung tachymetrische Vermessung einer Flughafendatenbank für Flughafen mittlerer Grösse .....	308
Tabelle 57:	Vor- und Nachteile der Nutzung von bodengestützten Vermessungsmethoden zum Erstellen der Vektorobjekte von Flughafendatenbanken nach RTCA Do-272a.....	316
Tabelle 58:	Vom Autor durch Aerodrome/Heliport Charts - ICAO erstellte bzw. aktualisierte Flughafendatenbanken .....	327
Tabelle 59:	Verfügbarkeit von AIP und Aerodrome/Heliport Chart -ICAO in ausgewählten Ländern.....	332
Tabelle 60:	Untersuchung der Abbildung von Flughafendatenbankobjekten auf Aerodrome/Heliport Charts -ICAO nach ICAO 8697.....	337
Tabelle 61:	Legende zu Tabelle 62: Mögliche Ergebnisse bei der Falluntersuchung der Vollständigkeit von Aerodrome/Heliport Charts -ICAO .....	340
Tabelle 62:	Falluntersuchung Vollständigkeit Aerodrome/Heliport Chart -ICAO .....	341
Tabelle 63:	Ergebnisse der Operational Safety Evaluation: <i>Paper Airport Charts for Use in Airport Surface Operations</i> .....	345
Tabelle 64:	Genauigkeit der Zuordnung der Referenzkoordinaten in der Papierkarte mit und ohne Koordinatengitter .....	348
Tabelle 65:	Abschätzung des Gesamtpositionsfehlers beim Vektorisieren von Objekten basierend auf Papierkarten.....	352
Tabelle 66:	Vergleich Positionsfehler von aus Aerodrome/Heliport Charts -ICAO extrahierten k Flughafendatenbankobjekten mit den Anforderungen Positionsfehler nach RTCA Do-272a "Medium".....	354
Tabelle 67:	Überlagerung von Flughafendatenbankobjekten aus Referenzdatenbanken auf georeferenzierte Aerodrome/Heliport Chart ICAO bzw. Airport Diagrams.....	357

Tabelle 68:	Beispiele von Fehlervektoren (gelb) zwischen Punkt auf Referenzdatenbank (rot) und identischem Punkt auf georeferenzierter Aerodrome/Heliport Chart ICAO bzw. Airport Diagrams.....	358
Tabelle 69:	Positionsfehler von Runway-Elementen auf der georeferenzierten Aerodrome/Heliport Chart ICAO bzw. Airport Diagram.....	359
Tabelle 70:	Positionsfehler von Taxiway-Elementen auf der georeferenzierten Aerodrome/Heliport Chart ICAO bzw. Airport Diagram.....	360
Tabelle 71:	Positionsfehler von Vertical Polygon Objects auf der georeferenzierten Aerodrome/Heliport Chart ICAO bzw. Airport Diagram.....	361
Tabelle 72:	Mittlerer Positionsfehler und die Standardabweichung zwischen Referenzdatenbank und georeferenzierter Aerodrome/Heliport Chart ICAO bzw. Airport Diagrams über alle gemessenen Fehlervektoren .....	363
Tabelle 73:	Geschätzter Aufwand zum Extrahieren von Flughafendatenbankobjekten aus Aerodrome/Heliport Charts -ICAO .....	367
Tabelle 74:	Vor- und Nachteile der Nutzung von Aerodrome/Heliport Charts –ICAO zum Erstellen der Vektorobjekte von Flughafendatenbanken nach RTCA Do-272a.....	371
Tabelle 75:	Legende zu Tabelle 76: Mögliche Ergebnisse bei der Falluntersuchung der Vollständigkeit von Karten und graphischen Datenbanken von Flughafenbetreibern.....	385
Tabelle 76:	Falluntersuchung Vollständigkeit von Karten und graphischen Datenbanken von Flughafenbetreibern.....	386
Tabelle 77:	Umfrageergebnisse zur Frage: „Positionsgenauigkeit von Karten und graphischen Datenbanken“ und Ableitung der zur weiteren Auswertung genutzten Positionsgenauigkeit .....	390
Tabelle 78:	Geschätzter Aufwand zum Extrahieren von Flughafendatenbankobjekten aus im Vektorformat vorliegenden graphischen Datenbanken (CAD, GIS) .....	394
Tabelle 79:	Geschätzter Aufwand zum Extrahieren von Flughafendatenbankobjekten aus Digitalen Karten und Papierkarten von Flughafenbetreibern.....	395
Tabelle 80:	Vor- und Nachteile der Nutzung von Karten und Datenbanken zum Erstellen der Vektorobjekte von Flughafendatenbanken nach RTCA Do-272a .....	399
Tabelle 81:	Verfahrensübergreifender Überblick bzgl. der Eignung der verschiedenen Verfahren zum Erstellen von Flughafendatenbank-Vektorobjekten nach RTCA Do-272a, Kategorie Medium unter Wahrung der Anforderungen an Vollständigkeit und Positionsgenauigkeit.....	402
Tabelle 82:	Vor- und Nachteile der Verfahren bzgl. Vollständigkeit, Positionsgenauigkeit, Verfügbarkeit und Aufwand .....	406
Tabelle 83:	Abschätzung zum Zeitaufwand von Change Detection, -Acquisition, -Integration und Change Transmission für Flughafendatenbanken .....	422
Tabelle 84:	Falluntersuchung der rechtzeitigen Veröffentlichung von NOTAMs .....	431
Tabelle 85:	Abschätzung der durch NOTAM, AIP Supplements und AIP Amendments adressierten Änderungen von Flughafendatenbankobjekten.....	437

Tabelle 86:	Ergebnisse der Evaluierung der Nutzbarkeit von NOTAMs, AIP Amendments und AIP Supplements zur Change Detection .....	438
Tabelle 87:	Erforderliche Information für Flughafendatenbanken nach Do-272a .....	516
Tabelle 88:	Positionsfehler von Runway-Elementen auf der georeferenzierten Aerodrome/Heliport Chart ICAO bzw. Airport Diagram.....	517
Tabelle 89:	Positionsfehler von Taxiway-Elementen auf der georeferenzierten Aerodrome/Heliport Chart ICAO bzw. Airport Diagram.....	517
Tabelle 90:	Positionsfehler von Vertical Polygon Objects auf der georeferenzierten Aerodrome/Heliport Chart ICAO bzw. Airport Diagram.....	518
Tabelle 91:	Ergebnisse der Umfrage zu Formaten von räumlichen Daten zum Infrastrukturmanagement und zur Unterstützung von Flugoperationen auf Flughäfen .....	531
Tabelle 92:	Ergebnisse der Umfrage zu Genauigkeit und Kenntnis des Referenzdatums und Projektion von räumlichen Daten zum Infrastrukturmanagement und zur Unterstützung von Flugoperationen auf Flughäfen .....	532
Tabelle 93:	Ergebnisse der Umfrage zur Verfügbarkeit von räumlichen Daten zum Infrastrukturmanagement und zur Unterstützung von Flugoperationen .....	533
Tabelle 94:	Ergebnisse der Umfrage zur Aktualisierung von räumlichen Daten zum Infrastrukturmanagement und zur Unterstützung von Flugoperationen .....	534
Tabelle 95:	Änderungsrelevante NOTAMs von Frankfurt (EDDF) im Zeitraum vom 13.05.2002 - 06.11.2002 .....	541
Tabelle 96:	Änderungsrelevante NOTAMs von Addis Abeba (HAAB) im Zeitraum vom 13.05.2002 - 06.11.2002 .....	543



#### IV. Definitionsverzeichnis

Definition A:	Definition Datenqualität ( <i>Data Quality</i> ).....	40
Definition B:	Definition Genauigkeit ( <i>Accuracy</i> ).....	40
Definition C:	Definition Integrität ( <i>Integrity</i> ).....	42
Definition D:	Definition Auflösung ( <i>Resolution</i> ).....	42
Definition E:	Definition Aktualität ( <i>Timeliness</i> ).....	43
Definition F:	Definition Verfolgbarkeit ( <i>Traceability</i> ).....	43
Definition G:	Definition Vollständigkeit ( <i>Completeness</i> ) .....	44
Definition H:	Definition Format.....	44

#### V. Formelverzeichnis

Formel 1:	Digitalisierungsintervall .....	107
Formel 2:	Optisches Auflösungsvermögen .....	154
Formel 3:	Berechnung der erforderlichen Flughöhe zum Erreichen einer bestimmten räumlichen Auflösung für chemo-optische Systeme.....	155
Formel 4:	Komponenten des horizontalen Positionsfehlers von Flughafendatenbank-Vektorobjekten, extrahiert aus fernerkundlichem Bildmaterial.....	186
Formel 5:	Bestimmung des maximalen Positionsfehlers eines Fernerkundungsbildes nach der Georeferenzierung .....	187
Formel 6:	Maximal zulässiger Positionsfehler des fernerkundlichen Bildes nach der Georeferenzierung .....	187
Formel 7:	Digitalisierfehler beim Scannen analoger Bilder .....	192
Formel 8:	Horizontale Positionsgenauigkeit von Neupunkten im Einzelmodell mit signalisierten GCPs .....	194
Formel 9:	Horizontale Positionsgenauigkeit von Neupunkten im Streifenmodell (mit signalisierten GCPs) .....	195
Formel 10:	Horizontale Positionsgenauigkeit von Neupunkten im Streifenmodell (mit natürlichen GCPs).....	195
Formel 11:	Horizontale Positionsgenauigkeit von Neupunkten im Luftbildblock.....	196
Formel 12:	Mittlere Horizontale Positionsgenauigkeit eines Punktes im Bildblock (signalisierte GCPs).....	197
Formel 13:	Mittlere Horizontale Positionsgenauigkeit eines Punktes im Bildblock (natürliche GCPs) .....	197
Formel 14:	Horizontaler Lagefehler der der indirekten Georeferenzierung durch Aerotriangulation.....	198
Formel 15:	Polynomische Transformationsgleichung höheren Grades $t$ .....	206
Formel 16:	Zur polynomischen Transformation eines höheren Grades $t$ benötigte Anzahl von GCPs.....	206

Formel 17:	Maximal verfügbares Fehlerbudget für die Einzelpunktmessung bei Nutzung absoluter Vermessungsmethoden .....	292
Formel 18:	Maximal verfügbares Fehlerbudget für die Einzelpunktmessung bei Nutzung relativer Vermessungsmethoden .....	292
Formel 19:	Herleitung der relativen Positionsgenauigkeit eines durch tachymetrische Messmethoden eingemessenen Neupunktes, basierend auf der Standardabweichung des Fehlers der Entfernungs- und Winkelmessung	300
Formel 20:	Polynomische Transformationsgleichung höheren Grades $t$ .....	323

## **VI. Verzeichnis der Abkürzungen**

<b>ACI</b>	Airport Council International
<b>ADS-B</b>	Automatic Dependant Surveillance Broadcast
<b>AEEC</b>	Airlines Electronic Engineering Committee
<b>AFTN</b>	Aeronautical Fixed Telecommunications Network
<b>AFS</b>	Aeronautical Fixed Service
<b>AGL</b>	Above Ground Level
<b>AIS</b>	Aeronautical Information Service
<b>AIP</b>	Aeronautical Information Publication
<b>AIRAC</b>	Aeronautical Information Regulation and Control
<b>AIXM</b>	Aeronautical Information Exchange Model
<b>ALP</b>	Airport Layout Plan
<b>AMASS</b>	Aerodrome Movement Area Safety System
<b>AMMX</b>	Airport Mapping Datascheme
<b>ARINC</b>	Aeronautical Radio, Inc.
<b>ASCII</b>	American Standard Coding for Information Interchange
<b>ASP</b>	NASA Aviation Safety Program
<b>ATC</b>	Air Traffic Control
<b>ATIS</b>	Automatic Terminal Information Service
<b>ATM</b>	Air Traffic Management
<b>C/A</b>	Coarse Aquisition
<b>CAA</b>	Civil Aviation Authority
<b>CAD</b>	Computer Aided Design
<b>CDTI</b>	Cockpit Display of Traffic Information
<b>CCD</b>	Charged Coupled Device
<b>CEP</b>	Circular Error Probability
<b>CE90</b>	90% Circular Error Probability
<b>CE95</b>	95% Circular Error Probability
<b>CFIT</b>	Controlled Flight into Terrain
<b>CFMU</b>	Central Flight Management Unit
<b>CPDLC</b>	Controller Pilot Data Link Communications
<b>CRC</b>	Cyclic Redundancy Check
<b>CS</b>	Control Segment
<b>DFS</b>	Deutsche Flugsicherung
<b>DGPS</b>	Differential GPS
<b>DME</b>	Distance Measurement Equipment

<b>DQS</b>	Data Quality System
<b>DTED</b>	Digital Terrain Elevation Data
<b>DVD</b>	Digital Versatile Disc
<b>DUT</b>	Darmstadt University of Technology
<b>eANS</b>	Lido Electronic Airport Navigation System
<b>ECC</b>	Parity Error Checking and Correcting
<b>EGNOS</b>	European Geostationary Navigation Overlay Service
<b>EUROCAE</b>	European Organisation for Civil Aviation Equipment
<b>FAA</b>	Federal Aviation Administration
<b>FATO</b>	Final Approach and Takeoff Area
<b>FIR</b>	Fernes Infrarot
<b>FIS-B</b>	Flight Information Services Broadcast
<b>FMS</b>	Flight Management System
<b>FNS</b>	Flight Navigation System
<b>FFTE</b>	Flight Technical Error
<b>FSR</b>	Institut für Flugsysteme und Regelungstechnik der TU-Darmstadt
<b>GBAS</b>	Ground based Augmentation System
<b>GCP</b>	Ground Control Point
<b>GDOP</b>	Geometric Dilution of Precision
<b>GIS</b>	Geographisches Informationssystem
<b>GNSS</b>	Global Navigation Satellite System
<b>GPS</b>	Global Positioning System
<b>GSD</b>	Ground Sampling Distance
<b>HDOP</b>	Horizontal Dilution of Precision
<b>HSALT</b>	NASA Hold Short Advisory Landing Technology
<b>HUD</b>	Head Up Display
<b>ICAO</b>	International Civil Aviation Organization
<b>IGS</b>	International GNSS Service
<b>IMC</b>	Instrument Meteorological Conditions
<b>ISPRS</b>	International Society for Photogrammetry and Remote Sensing
<b>JAA</b>	Joint Aviation Authority
<b>LAHSO</b>	Land and Hold Short Operations
<b>LAN</b>	Local Area Network
<b>LEP</b>	Linear Error Probability
<b>LIDAR</b>	Light Intensity and Range
<b>LORAN</b>	Long Range Navigation
<b>MIR</b>	Mittleres Infrarot



<b>MS</b>	Microsoft
<b>MSL</b>	Mean Sea Level
<b>NACO</b>	National Aeronautical Charting Office
<b>NASA</b>	National Aeronautics and Space Administration
<b>NGS</b>	National Geodetic Survey
<b>NDB</b>	Non-Directional Beacon
<b>NIR</b>	Nahes infrarot
<b>NM</b>	Nautical Miles
<b>NOTAM</b>	Notice for Airman
<b>NTSB</b>	National Transportation Safety Board
<b>OANS</b>	Onboard Airport Navigation System
<b>OEEPE</b>	Organisation für experimentelle photogrammetrische Forschung
<b>P</b>	Precision
<b>PACS</b>	Primary Airport Control Station
<b>Pan</b>	Panchromatisch
<b>PCN</b>	Pavement Classification Number
<b>PDOP</b>	Position Dilution of Precision
<b>Pixel</b>	Picture Element
<b>PDE</b>	Path Definition Error
<b>PEE</b>	Position Estimation Error
<b>PLL</b>	Phase-Locked Loop
<b>PRN</b>	Pseudo-Random-Noise
<b>PPS</b>	Precision Positioning Service
<b>PSE</b>	Pilot Steering Error
<b>RAAS</b>	Honeywell Runway Awareness & Advisory system
<b>RCP</b>	Quickbird Rational Polynomial Coefficients
<b>RIPS</b>	NASA Runway Incursion Prevention System
<b>RMI</b>	Radio Magnetic Indicator
<b>RMS</b>	Root Mean Square
<b>RMSE</b>	Root Mean Square Error
<b>RNAV</b>	Area Navigation
<b>RNP</b>	Required Navigation Performance
<b>RT</b>	Real Time
<b>RTCA</b>	Radio Technical Commission for Aeronautics
<b>RTK</b>	Real Time Kinematic
<b>RVR</b>	Runway Visibility Range

<b>SACS</b>	Secondary Airport Control Station
<b>SARPS</b>	Standards and Recommended Procedures
<b>SBAS</b>	Space Based Augmentation System
<b>SMMD</b>	Surface Moving Map Display
<b>SOP</b>	Standard Operating Procedures
<b>SPS</b>	Standard Positioning Service
<b>SRN</b>	Signal Noise Ratio
<b>SS</b>	Space Segment
<b>SSR</b>	Surface Surveillance Radar
<b>SV</b>	Space Vehicle
<b>SVS</b>	Synthetic Vision System
<b>TAWS</b>	Terrain Avoidance and Warning System
<b>TDOP</b>	Time Dilution of Precision
<b>TIR</b>	Thermisches Infrarot
<b>TIS-B</b>	Traffic Information Service - Broadcast
<b>TLOF</b>	Touchdown and Lift-off Area
<b>TLS</b>	Target Level of Safety
<b>TOPMS</b>	NASA Takeoff Performance Monitoring System
<b>TPA</b>	Jeppesen Taxiing Positional Awareness Display
<b>TSE</b>	Total System Error
<b>TUD</b>	Technische Universität Darmstadt
<b>UNO</b>	United Nation Organization
<b>US</b>	United States
<b>US</b>	User Segment
<b>UTC</b>	Universal Time Coordinated
<b>VDOP</b>	Vertical Dilution of Precision (
<b>VIS</b>	Visible (Wellenlängenbereich des sichtbaren Lichtes)
<b>VMC</b>	Visible Meteorological Conditions
<b>VOR</b>	VHF Omni-Directional Range
<b>VSD</b>	Vertical Situation Display
<b>WAAS</b>	Wide Area Augmentation System
<b>WGS</b>	World Geodetic System

# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

Die Bedeutung von digitalen Daten zur Flugführung nahm im Laufe der Evolution von Flugnavigations- und Flugsicherungsverfahren stetig zu. Heute werden kommerzielle und militärische Luftfahrzeuge auf dem Grossteil ihres Flugweges durch Flight-Management-Systeme (FMS) gesteuert, welche auf digital gespeicherte Daten von Wegpunkten und Luftfahrtstrassen zugreifen. Untersuchungen zur Qualität von Luftfahrtdaten sowohl durch nationale als auch internationale Luftfahrtbehörden zeigten jedoch, dass die zur Flugführung erforderliche Datenqualität in vielen Fällen nicht gewährleistet werden kann.

Der Industriestandard RTCA Do-200a liefert Vorgaben zum Qualitätsmanagement für Luftfahrtdaten. Er beschreibt einen Lebenszyklus von Luftfahrtdaten durch eine Datenkette mit den vier Gliedern Datenerstellung, Datenaufbereitung, Anwendungsintegration und Anwendung. Im Rahmen der Untersuchungen zur Qualität von Luftfahrtdaten wurde das Datenerstellungsglied als kritischer Punkt dieser Kette identifiziert. Es steuert die initiale und nur im gewissen Rahmen reversible Ausprägung der Genauigkeit und Vollständigkeit von Daten und nimmt daher eine Sonderrolle innerhalb der Luftfahrtdatenkette ein.

Die stetige Zunahme des Luftverkehrs in den letzten 15 Jahren bedingte eine Zunahme von Runway-Incursion-Vorfällen um nahezu 80% sowie längere Rollzeiten auf den Flughäfen. Zwei schwere Runway Incursion Unfälle in Tapei-Chiang Kai Shek in 2000 und Milano-Linate in 2001 rückten die Runway-Incursion Problematik in das Blickfeld der Öffentlichkeit. Für das Starten, Landen und Rollen von Flugzeugen sowie deren Abfertigung auf Flughäfen wurden in Analysen von Luftfahrtbehörden zukünftige Kapazitätsengpässe prognostiziert.

Verschiedene Systeme, die sowohl boden- als auch cockpitseitig genutzt werden, sollen durch erhöhtes Situationsbewusstsein der Piloten und Lotsen einen effizienteren und sichereren Rollvorgang gewährleisten. Die Einführung dieser Systeme erfolgt schrittweise, kurzfristig mit der Implementierung von einfachen Rollführungsanzeigen auf dem Airbus A380 und der Boeing 777, und mittelfristig mit der Einführung von fortgeschrittenen A-SMGCS (Advanced Surface Movement Guidance Systemen), welche strategische Rollplanung und taktische Rollführung durch Integration der Kontroll- und Überwachungsfunktion der Lotsen mit der Navigationsfunktion der Piloten und Versorgungsfahrzeugen auf dem Flughafen verbinden.



Quelle: Airbus

Abbildung 1: A380 OANS (Onboard Airport Navigation System)

Zur Nutzung dieser Systeme werden detaillierte, lagegenaue räumliche Daten des Flughafenlayouts sowie Informationen bezüglich räumlicher operationeller Besonderheiten, wie z.B. Spannweiteinschränkungen für bestimmte Rollwege benötigt.

Inhalt, Struktur und Datenqualität dieser so genannten Flughafendatenbanken wurden unter Beteiligung des Autors im Rahmen des internationalen Industriestandardisierungskomitees RTCA SC-193 definiert und in dem Luftfahrtstandard RTCA Do-272 „*User Requirements for Aerodrome Mapping Information*“ im Sommer 2001 veröffentlicht.

Durch die bevorstehende Implementierung der oben genannten Systeme besteht sowohl industrieseitig als auch seitens der Luftfahrtbehörden starkes Interesse an der Erstellung von Flughafendatenbanken, welchen die Anforderungen des Standards erfüllen. EUROCONTROL entwickelt gegenwärtig offene Datenaustauschmodelle für Flughafendatenbanken; die FAA erzeugte im Rahmen eines Forschungsprojekts mehr als 80 Flughafendatenbanken von amerikanischen Flughäfen; Jeppesen-Sanderson erzeugte und unterhält Flughafendatenbanken für mehr als 300 Flughäfen weltweit nach dem Industriestandard RTCA Do-272. Basierend auf der industrieseitigen Erfahrung, welche im Rahmen der großmaßstäblichen Erzeugung von Flughafendatenbanken gewonnen wurde, wurde der Standard in den Jahren 2003 – 2005 erneut angepasst und als RTCA Do-272a 2005 publiziert. Die ICAO plant die Übernahme der Datenanforderungen aus RTCA Do-272a in ICAO Annex 14.

Untersuchungen am Institut für Flugsysteme und Regelungstechnik der TU-Darmstadt zeigten, dass die von nationalen zivilen Luftfahrtbehörden gegenwärtig veröffentlichten Flughafenkarten und Flugplatzrollkarten sowohl bezüglich des Inhalts als auch der Datengenauigkeit die definierten Anforderungen von Flughafendatenbanken nicht erfüllen. Daher müssen zum Erzeugen von Flughafendatenbanken alternative Quellen ermittelt werden. Bedingt durch die hohe Dynamik des Umfeldes veralten sie jedoch sehr schnell. Bei der Definition eines Lebenszyklus für Flughafendatenbanken müssen daher zusätzlich zur Datenerstellung auch Verfahren zur Aktualisierung berücksichtigt werden, um die benötigte Datenqualität garantieren zu können.

## 1.2 Ziel

Ziel der Dissertation ist die Definition eines Luftfahrtdaten-Lebenszyklus für Flughafendatenbanken unter Berücksichtigung der Datenqualitätsanforderungen nach RTCA Do-272a und RTCA Do200a, um die Nutzung von Flughafendatenbanken im Rahmen von sicherheitskritischen Flugführungsanwendungen zu ermöglichen.

## 1.3 Aufbau

Die vorliegende Arbeit lässt sich zunächst in zwei Teile aufteilen: Dem ersten Teil, in dem die Grundlagen erläutert bzw. erarbeitet werden, und dem zweiten Teil, in welchem der Forschungsschwerpunkt der Arbeit liegt.

### Grundlagen:

Der Grundlagenteil umfasst eine Einführung in die historische Entwicklung der Nutzung von digitalen Daten zur Flugführung sowie die Nutzung in der Gegenwart. Aus Gründen der Sicherheitsrelevanz bzgl. des hohen Nutzungsgrads von digitalen Daten im Rahmen von sicherheitskritischen Flugführungsapplikationen werden Vorschriften zum Qualitätsmanagement von Luftfahrtdaten erläutert und auf deren Inhalte näher eingegangen. Insbesondere der Aufbau einer Luftfahrtdatenkette nach RTCA Do-200a wird erläutert und deren Rahmenparameter untersucht.

Durch die Herleitung der Notwendigkeit von Flughafendatenbanken zur Erhöhung der Sicherheit insbesondere in Hinblick auf *Runway Incursion* sowie zur Erhöhung des Verkehrsflusses wird die Erweiterung des Spektrums an digitalen Daten zur Flugführung um die Komponente „Flughafendatenbanken“ begründet.

Schließlich wird als Grundlage für die Forschungsarbeit im zweiten Teil das Erstellen von Datenanforderungen für Flughafendatenbanken im Rahmen des RTCA Komitees SC-193 erläutert. Die Mitarbeit des Autors in dem Standardisierungskomitee lässt die Erläuterung besonderer Aspekte der Komiteearbeit zu.

### Forschungsschwerpunkt:

Der Forschungsschwerpunkt der Arbeit ist wiederum in zwei Teile aufgegliedert:

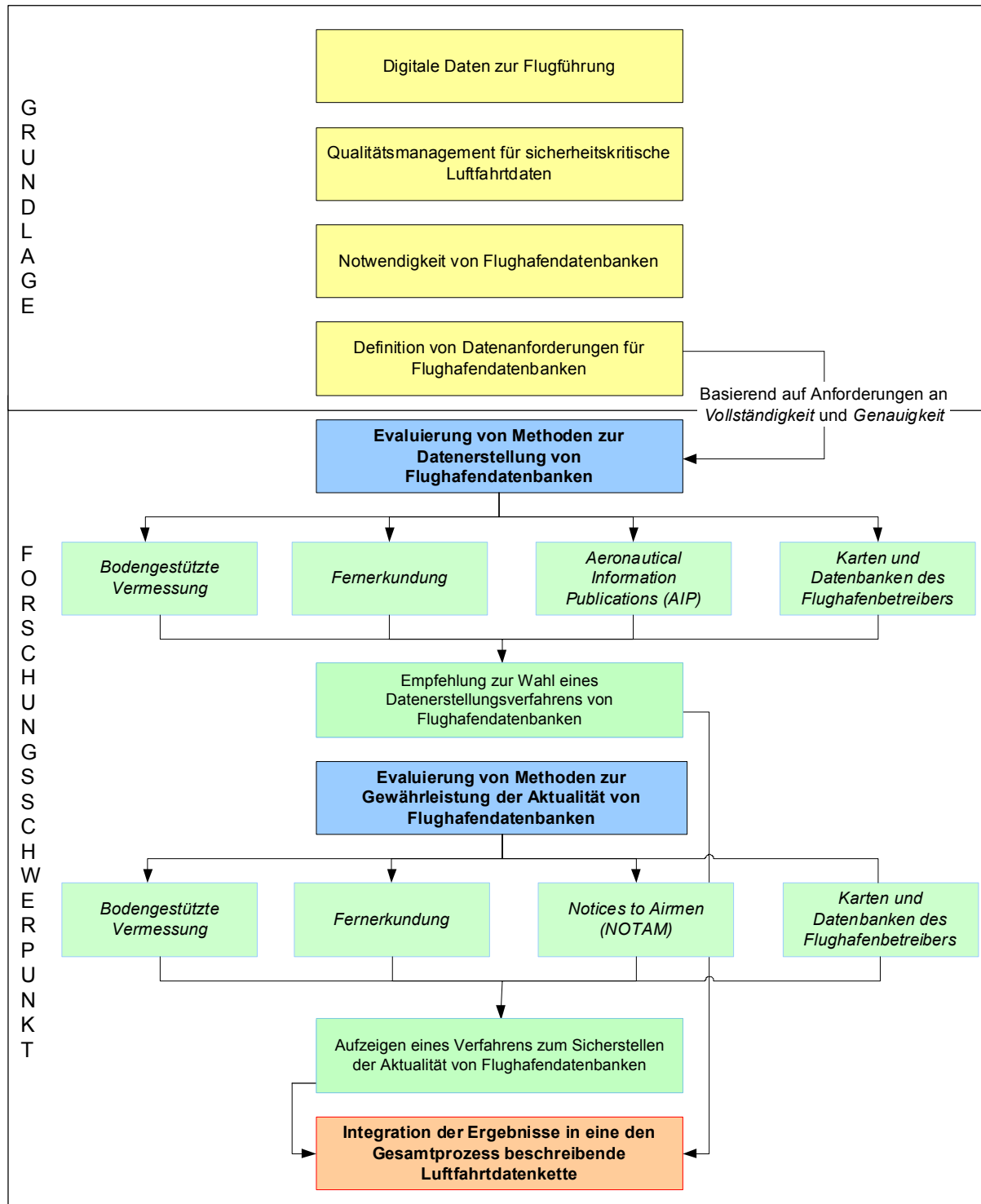
Im ersten Teil werden basierend auf Datenanforderungen an Flughafendatenbanken, welche im RTCA Dokument Do-272a *User Requirements for Aerodrome Mapping Information* niedergelegt sind, verschiedene Methoden zur Datenerstellung von Flughafendatenbanken unter den Aspekten der Vollständigkeit und Genauigkeit evaluiert. Zu den untersuchten Datenerzeugungsmethoden gehören

- Methoden der Fernerkundung
- Bodengestützte Vermessungsverfahren
- Ableitung der benötigten Daten aus Aeronautical Publication Information
- Ableitung der benötigten Daten aus Karten und Datenbanken des Flughafenbetreibers

Das Erfüllen der definierten Anforderungen wird durch Analyse von Fachliteratur, Produktspezifikationen sowie Falluntersuchungen mittels Testdatensätzen untersucht. Als Ergebnis der Evaluierung wird ein Verfahren zur Datenerstellung von Flughafendatenbanken empfohlen.

Im zweiten Teil werden Methoden zur Gewährleistung der Aktualität von Flughafendatenbanken evaluiert. Hierbei wird insbesondere auf die regelmäßige und rechtzeitige Verfügbarkeit von Daten zum Revidieren von Flughafendatenbanken eingegangen.

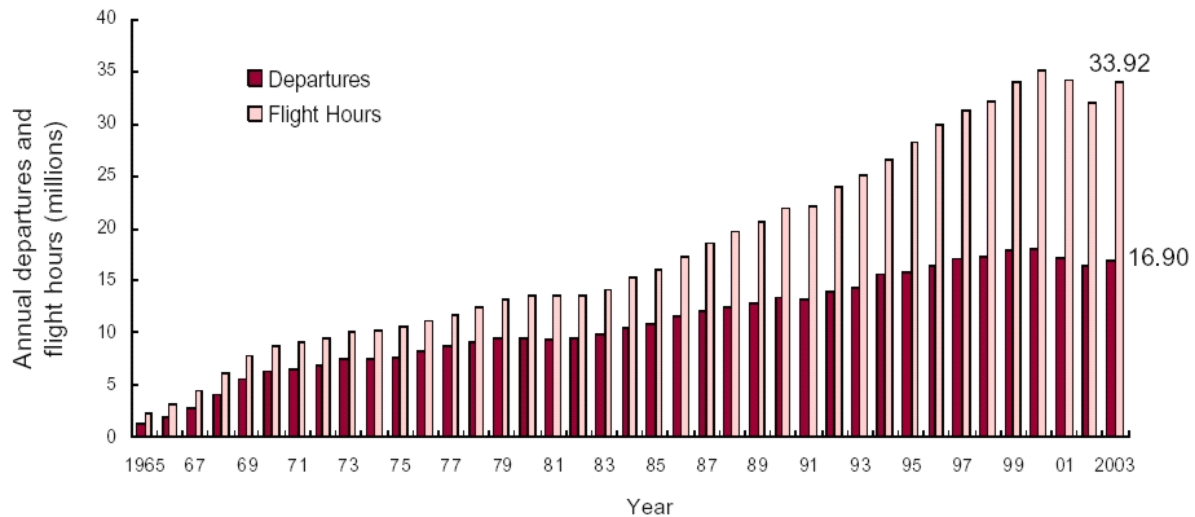
Durch die Einbindung der Resultate zur Evaluierung von Verfahren zur Datenerstellung und Datenaktualisierung kann als Abschluss des Forschungsschwerpunkts ein exemplarischer Lebenszyklus für Flughafendatenbanken basierend auf den Luftfahrtstandards RTCA Do-200a und Do-272a erstellt werden. Der Aufbau der Arbeit wird in Abbildung 2 dargestellt:



Quelle: Eigene Abbildung  
Abbildung 2: Aufbau der Arbeit

## 2 Die Nutzung von digitalen Daten zur Flugführung

Seit dem Beginn des Jet-Zeitalters ab ca. 1950 nahm die Anzahl der Flugbewegungen weltweit kontinuierlich zu. In dem Zeitraum von 1965 bis 2003 vervierzehntfachte sie sich.



Quelle: [Boe2004]

Abbildung 3: Entwicklung der weltweiten Flugbewegungen (Departures) sowie Flugstunden (Flight Hours) im Zeitraum von 1965 bis 2003

Insbesondere der europäische und amerikanische Luftraum sind von der steigenden Verkehrsdichte betroffen. Um Verspätungen und Gefährdung der Flugsicherheit durch Luftraumüberfüllung zu vermeiden, mussten bereits früh Maßnahmen zur langfristigen Gewährleistung der wirtschaftlichen Effizienz und Sicherheit der Flugdurchführung getroffen werden.

Die hierzu getroffenen Maßnahmen betrafen zwei Bereiche der Verkehrsfliegerei:

- Luftfahrzeuge und -Antriebe
- Flugnavigation und *Air Traffic Management* (ATM).

Die Einführung von *Flight Navigation Systems* (FNS) seit 1970 und in deren Zuge die Nutzung von digitalen Daten zur Flugführung erlaubten eine Evolution des *Air Traffic Managements* (ATM) und trugen zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit der Flugdurchführung unter Beibehaltung von existierenden bzw. verbesserten Sicherheitsniveaus bei. Die wachsende Bedeutung digitaler Daten zur Flugführung ist eng verbunden mit der Evolution der Flugnavigation und des ATMs.



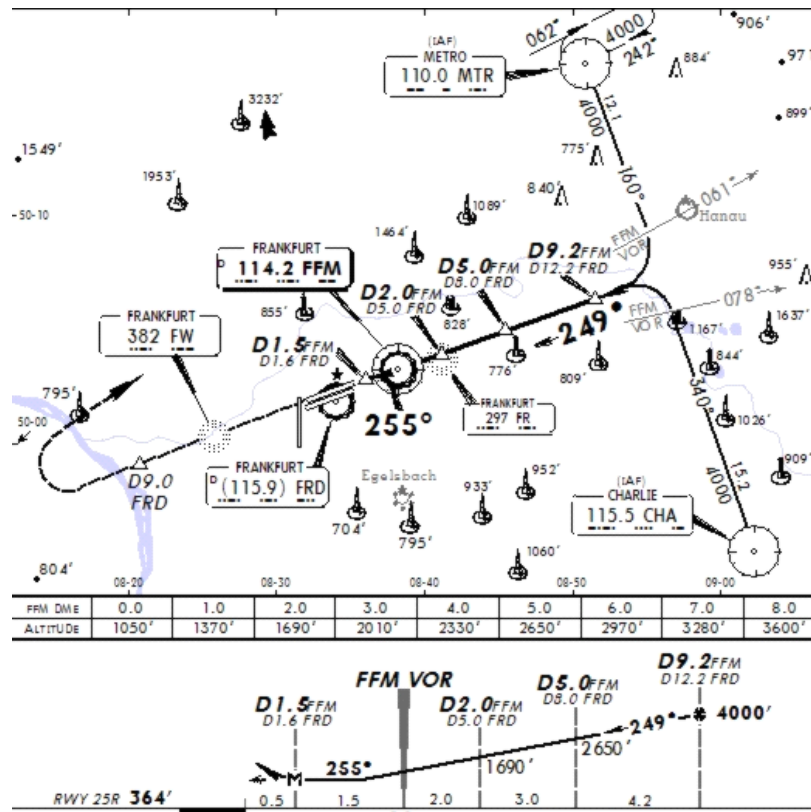


## 2.1 Evolution der Flugnavigation und des Air Traffic Management

Die Aufnahme einer regelmäßigen Luftpost-Verbindung zwischen New York und Washington am 12. August 1918 markiert den Anfang der kommerziellen Luftfahrt in den U.S.A. Zunächst erfolgte Flugnavigation visuell anhand von markanten Landmarken oder eigens hierzu errichteten Luftfahrt-Leuchtleuchten sowie in Form von Kopplungsnavigation. Gute Sichtbedingungen waren zur Flugdurchführung unabdingbar. Die Instrumente im Cockpit beschränkten sich auf Fluggeschwindigkeitsanzeige, Höhenmesser, Magnetkompass und Drehzahlmesser [Juk2004]. Zur Unterstützung der visuellen Navigation wurden zunächst stichwortartige Navigationshinweise genutzt, welche von Piloten gesammelt und vom *U.S. Post Office Department* veröffentlicht wurden. Später wurden diese durch Luftfahrtkarten, welche topographische Details, Flughäfen und Luftstrassen abbildeten, ergänzt [Lan1996]. Die sukzessive Einführung von bodengestützten Funknavigationseinrichtungen wie *Non-Directional Beacons* (NDB) ab ca. 1930 und von weiterentwickelten Funknavigationseinrichtungen wie *VHF Omni-directional Range* (VOR), *Distance Measurement Equipment* (DME) und weiträumige Radarüberwachung ab ca. 1950 ermöglichte eine genauere Navigation sowohl bei schlechten Sichtbedingungen als auch in großen Höhen.

Da die im Cockpit zur Funknavigation genutzten Sensoren, wie z.B. der *Radio Magnetic Indicator* (RMI), lediglich die Richtung des gewählten Funkfeuers relativ zur eigenen Position indizierten, erlaubte die Navigation mittels NDB ausschließlich Flüge direkt auf die Funknavigationseinrichtungen zu und von ihnen weg. Luftstrassen wurden dementsprechend als Verbindungslinien mehrerer Funknavigationseinrichtungen definiert. Um auf ein Luftstraßensystem zu gelangen, fliegt man von einem Startflughafen über eine lokale Abflugroute (*Departure Route, Transition*) auf das Luftstraßensystem auf und verlässt es in der Nähe des Zielflughafens wieder über eine lokale Ankunftsroute (*Arrival Route*).

Zur Navigation auf den Luftstrassen wurden Funknavigationseinrichtungen entsprechend dem schriftlich vorliegenden Flugplan nacheinander abgeflogen. Sobald die erste Funknavigationseinrichtung überflogen war, wurde die Frequenz der nächsten im RMI eingestellt. Hierzu wurden Kennung und Frequenz der Funknavigationseinrichtungen benötigt. Genauso wie weitere zur Flugdurchführung benötigte Information bezüglich der Luftraumeinteilungen, der Lage von Flughäfen wurde diese Information in Form von Luftfahrtkarten und zusätzlichem Textmaterial zur Verfügung gestellt [Lan1996]. Die genauen Koordinaten der Position der Funknavigationseinrichtungen waren der betreibenden Luftfahrtbehörde zwar bekannt, spielten aber für die Flugnavigation keine Rolle, da lediglich die relative Position des Flugzeugs zur Funknavigationseinrichtung für die Flugdurchführung berücksichtigt wurde [TPC1997]. Um Landungen auch unter schlechten Sichtbedingungen zu ermöglichen, wurden Funknavigationseinrichtungen auf den Flughäfen oder in deren unmittelbarer Nähe errichtet. Auf ihnen basierend konnten lokale Anflugrouten definiert werden, mittels derer Flugzeuge auch bei schlechten Sichtbedingungen bis nahe an den Aufsetzpunkt eines Flughafens geführt werden konnten. Bei diesen so genannten *Non-Precision-Approaches* liefern die Funknavigationseinrichtungen die laterale Navigationsinformation, die vertikale Komponente liefert der barometrische Höhenmesser bzw. der Radarhöhenmesser. Die zeitliche Komponente, wann man welche Kurs- bzw. Höhenänderung vorzunehmen hat, liefert die Detailskizze des Anfluges in der Luftfahrtkarte.



Quelle: Jeppesen JeppView©

Abbildung 4: Anflugkarte für Non-Precision-Approach Frankfurt (EDDF VOR DME RWY 25R):

Oberer Teil: Darstellung der lateralen Anflugkomponente; Unterer Teil: Darstellung der vertikalen Anflugkomponente.

Um sichere Landungen auch unter schlechten Sichtverhältnissen zu ermöglichen, bei denen keine *Non-Precision-Approaches* mehr durchgeführt werden konnten, wurden Ende der 60er Jahre so genannte *Precision-Approaches* eingeführt [DFSQS3]. Die hierzu entwickelten Instrumenten-Landesysteme (ILS) und die später entwickelten Mikrowellen-Landesysteme (MLS) bieten nicht nur eine hochgenaue, auf den Aufsetzpunkt ausgerichtete laterale Führung, sondern auch eine ebenfalls auf den Aufsetzpunkt ausgerichtete hochgenaue vertikale Führung.

### 2.1.1 Area Navigation (RNAV)

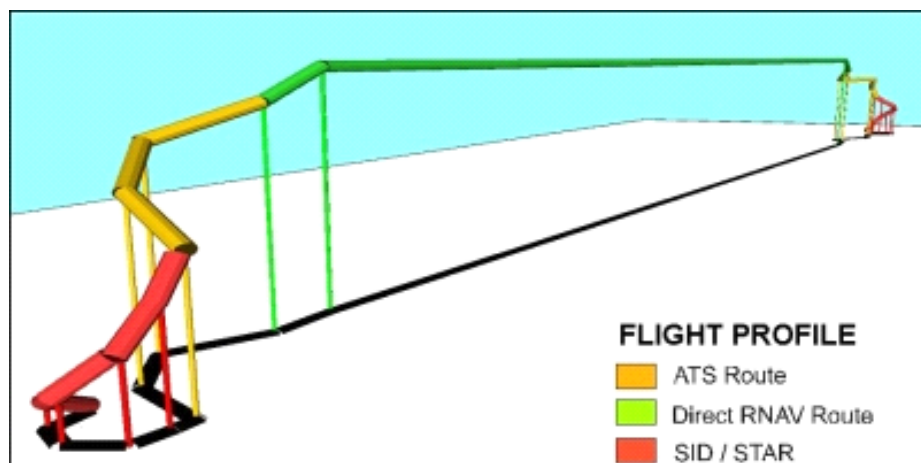
Mit steigendem Luftverkehrsaufkommen wurde bald deutlich, dass das klassische ATM basierend auf dem starren, durch Punkt-zu-Punkt Verbindungen definierten Luftstraßensystem bald an seine Grenzen stoßen würde [FR2002], da der zur Verfügung stehende Luftraum nur sehr eingeschränkt über direkte Verbindungen zwischen Funknavigationseinrichtung genutzt wird, wohingegen der restliche Luftraum weitgehend ungenutzt den wenigen visuell navigierenden zivilen Piloten und dem Militär vorbehalten bleibt. Um von einem Start- zum Zielflughafen zu gelangen, kann im klassischen Luftfahrtstrassensystem nicht die direkte „Luftlinie“ als kürzeste Verbindung zweier Orte genutzt werden, sondern es müssen teilweise erhebliche Umwege aufgrund der ungünstigen räumlichen Verteilung der Funknavigationseinrichtungen und dem damit assoziierten Luftstrassensystem in Kauf genommen werden:



Quelle: [ALL2005]

Abbildung 5: Streckendifferenz von 18% zwischen VOR/NDB basierter Route (rot, 215 nm) und RNAV-Route (grün gestrichelt, 175 nm) auf der Strecke Belgrade-Haines.

Bereits in den 60er Jahren des 20. Jahrhunderts wurde daher das Konzept der *Area Navigation* (RNAV) entworfen und sukzessive auch umgesetzt. Mittels RNAV konnten neue Luftstrassen weitgehend unabhängig von der räumlichen Verteilung von Funknavigationsanlagen definiert und befliegen werden. Hierdurch konnte die Flugroute der direkten Verbindungen zwischen Start- und Zielflughafen angenähert werden. Das in Abbildung 6 dargestellte RNAV Flugprofil besteht aus einer Standard Instrument Departure-Route (SID), einem *Transition*-Segment zur RNAV-Route, der RNAV-Route in Form einer Direktverbindung, einem Transition-Segment und der *Standard Arrival Route* (STAR):



Quelle: [EUR2001]

Abbildung 6: RNAV Flugprofil

Ermöglicht wurde die Umsetzung von RNAV durch die Entwicklung von genauen und zuverlässigen Navigationssystemen, welche auf mehreren Sensorsystemen fundieren:

- Auf kreisel- bzw. laser-gestützten inertialen Navigationssystemen (INS) zur hochgenauen Koppelnavigation.
- Auf bodengestützten Funknavigationseinrichtungen im Langwellenbereich wie VLF und OMEGA, welche Positionsbestimmung durch Trilateration auch in großer Entfernung zur Funknavigationseinrichtung ermöglichen.

- Auf bodengestützten kurzwelligen Funknavigationseinrichtungen, insbesondere VOR und DME.
- Auf LORAN-C, einem auf Multilateration und Laufzeitmessung basierenden Funknavigationssystem.
- Auf weltraumgestützten, auf Laufzeitmessung basierenden *Global Navigation Satellite Systems* (GNSS).

[Cla1997]

Einen bedeutenden Entwicklungsschub leistete insbesondere die Entwicklung und Inbetriebnahme von auf Laufzeitmessung basierenden weltraumgestützten *Global Navigation Satellite Systems* (GNSS), welche weltweit hochgenaue absolute vertikale und laterale Positionsangaben liefern, insbesondere das *Navstar Global Positioning System* (GPS), welches vom amerikanischen *Department of Defense* (DOD) betrieben wird.

Zur Ermittlung der aktuellen Position wird das Signal aller verfügbaren Navigationssensoren an Bord ausgewertet. Sind mehrere Sensoren verfügbar, kann die Information einzelner Sensoren gemäß ihrer Genauigkeitscharakteristik verschieden gewichtet oder fehlerhafte Navigationssensoren durch Filter von der Positionsberechnung ausgeschlossen werden. Die durch integrale Navigationssysteme erreichbare Positionsgenauigkeit hängt von der Genauigkeitscharakteristik der einzelnen Navigationssensoren ab. Ergebnis der internen Berechnung eines Flugnavigationssystems ist die aktuelle Flugzeugposition in Bezug auf ein globales geographisches Referenzsystem. Diese kann unter Nutzung von INS in sehr geringen Intervallen neu berechnet werden [EEC1994].

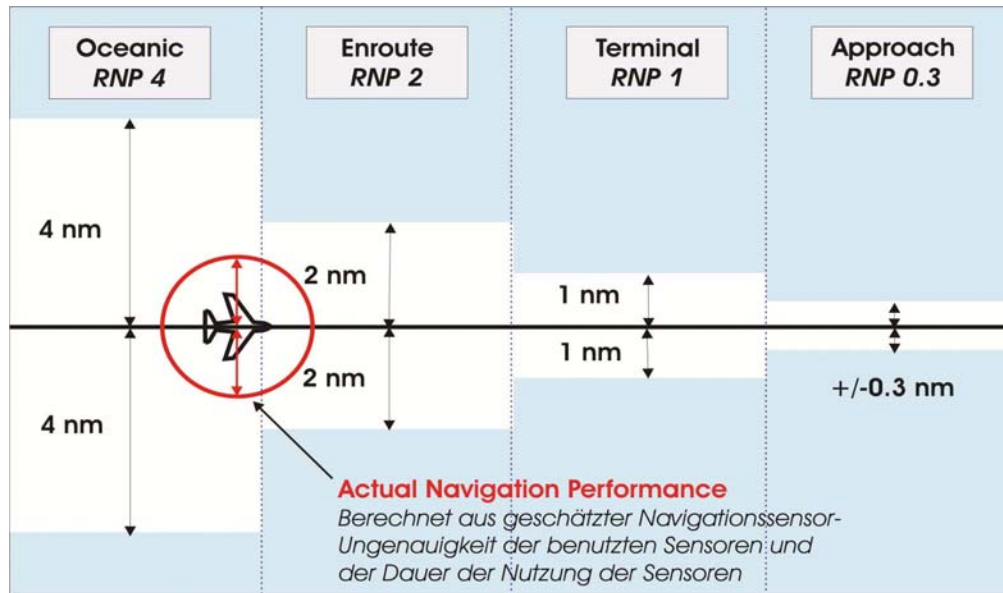
Stehen die genauen Koordinaten der Flugroute in digitaler Form einem Navigationssystem zur Verfügung, kann bei ständiger Verfügbarkeit der Flugzeugposition in einem Weltkoordinatensystem die vorgegebene Flugroute automatisch abgeflogen werden. Durch Abgleich der aktuellen Ist-Position des Flugzeuges mit den gespeicherten Koordinaten der Flugroute (Soll-Flugpfad) kann das Flugzeug durch den Autopiloten auf Kurs gehalten oder dem Piloten durch Anzeigsysteme (z.B. Flight Director) Steuerkommandos übermittelt werden. Die Genauigkeit des tatsächlich geflogenen Flugpfades hängt hierbei zum einen von der Positionsgenauigkeit der benutzten Navigationssensoren ab, zum anderen von der Genauigkeit der Wegpunkte, welche die Flugroute definieren. In dieser Form wurden mit der Einführung von RNAV erstmals digitale aeronautische Daten, welche die Flugroute definierten, zur taktischen Flugführung eingesetzt.

RNAV wurde zunächst im Streckenflug implementiert, für den nur geringe laterale und vertikale Navigationsgenauigkeiten und hohe Mindestabstände eingehalten werden müssen. Geringe Abweichungen vom Sollflugpfad aufgrund mangelhafter Datenqualität der digitalen aeronautische Daten hatten daher nur geringe Auswirkungen auf die Flugsicherheit. Mit der Einführung von *Precision-RNAV* (P-RNAV) Routen ab 1998, und der Erweiterung von RNAV auf An- und Abflugverfahren mit deutlich geringeren lateralen und vertikalem Mindestabständen zu Gelände, Hindernissen und anderen Luftfahrzeugen wurde eine erheblich verbesserte Navigationsgenauigkeit benötigt. Da die Navigationsgenauigkeit unter anderem eine Funktion der Datengenauigkeit der digitalen aeronautische Daten ist, bekam das Sicherstellen der Datenqualität der die Flugroute und der die bodengestützten Navigationseinrichtungen definierenden Daten im bodeneigenen Navigationssystem sicherheitskritische Bedeutung [EEC1994].

### 2.1.2 Required Navigation Performance (RNP)

Das *Required Navigation Performance*-Konzept (RNP) ist eng verbunden mit der Umsetzung von RNAV. Die RNP definiert einen Luftraum durch eine Navigationsgenauigkeit, die von einem Luftfahrzeug erfüllt werden muss, um sich in ihm bewegen zu dürfen [ICAO9613]. Basierend auf der RNP können Luftfahrzeuge in Abhängigkeit von ihrer

Navigationsgenauigkeit voneinander lateral getrennt werden; Luftfahrzeuge mit geringer Navigationsgenauigkeit müssen größere Abstände einhalten als Luftfahrzeuge mit hoher Navigationsgenauigkeit. Auf RNP-Routen muss die aktuelle Navigationsgenauigkeit (*Actual Navigation Performance* –ANP) ständig mit der RNP verifiziert werden, um sicherzustellen, dass die ANP eines Luftfahrzeugs der erforderlichen RNP des Routensegments bzw. des Luftraumes entspricht.



Quelle: [Juk2004]

Abbildung 7: RNP-Konzept

Die RNP-Routenstruktur unterstützt eine signifikante Reduktion des lateralen und vertikalen Minimalabstandes im Vergleich zu traditioneller NDB/VOR/DME Navigation [Juk2004].

Mit der Implementierung von GNSS als Navigationssensor und der hierdurch zu erzielenden hohen Positionsgenauigkeit konnte das RNP-Konzept auch auf An- und Abflugverfahren erweitert werden. Hierdurch wurden Präzisionsanflüge unter schlechten Sichtbedingungen auch für Flughäfen ermöglicht, die keine bodengestützten ILS/MLS-Navigationseinrichtungen besitzen, sei es aus wirtschaftlichen Gründen, oder weil wegen der gebirgigen Topographie der Betrieb von ILS-Navigationseinrichtungen für *Precision Approaches* nicht möglich ist. Das horizontale Flugführungssignal eines ILS-Localizers wird hierbei durch ein Onboard-Navigationssystem, welches die aktuelle Position liefert, und einer Onboard-Datenbank, welche den horizontalen Sollflugpfad mittels digitaler aeronautischer Daten definiert, ersetzt.

Eine große Herausforderung sowohl an die Genauigkeit und Zuverlässigkeit des Onboard-Navigationssystem, als auch an die Datenqualität der Onboard-Navigationsdatenbank stellte die Einführung des RNP-0.15-Anflugverfahrens mit 0.15 nautischen Meilen erforderlicher Navigationsgenauigkeit auf Runway 26 in Juneau, Alaska für die *Alaska Airlines* dar. Vor der Einführung des RNP-Anflugverfahrens war ein Anflug durch das enge, gebogene Tal zur Landung auf Landebahn 26 nur unter Sichtflugbedingungen möglich. Unter Instrumentenflugbedingungen konnte ausschließlich aus Westen auf Landebahn 08 angefliegen werden. Dies hatte zur Folge, dass bei Westwind teilweise sicherheitskritische Landungen mit Rückenwind durchgeführt wurden, bzw. Flüge auf Ausweichflughäfen umgeleitet wurden. Die Kosteneinbußen für *Alaska Airlines* waren erheblich. Eine ILS-Installation für Landebahn 26 war aufgrund des wegen hoher Berge gebogenen Anflugfades nicht möglich. Der RNP-0.15 Anflug ermöglichte *Alaska Airlines* Anflüge auf Landebahn 26 auch bei schlechter Sicht [Juk2004] und bedeutete eine Steigerung der Wirtschaftlichkeit bei hohem Sicherheitsniveau der Flugoperation.



Quelle: Eigene Grafik

Abbildung 8: RNP-0.15 Anflug auf Runway 26 Juneau, Alaska

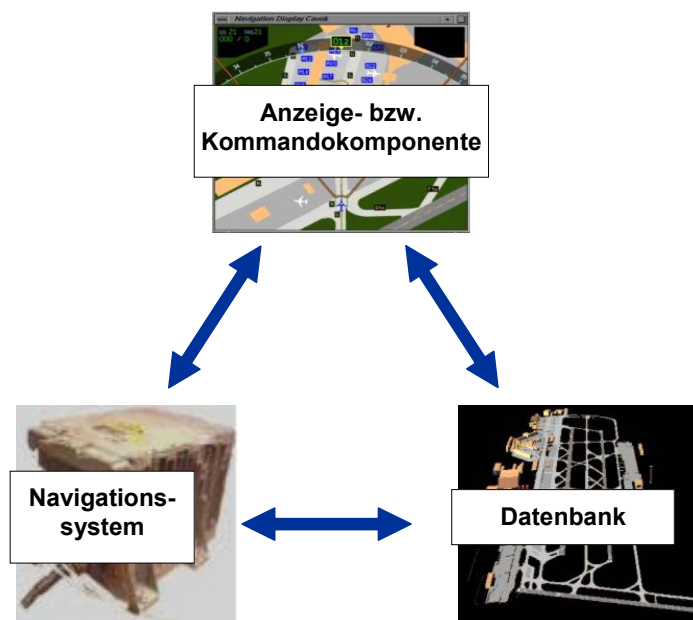
In dem Rahmen der Sollflugpfaddefinition des RNP-Anflugs war die Datenqualität der zur Modellierung des Flugpfades genutzten aeronautischen Daten von sicherheitskritischer Bedeutung. Im Gegensatz zur bisherigen RNAV-Flugführung im Enroute-Bereich hätten Datenfehler in der Onboard-Datenbank, wie z.B. falsche bzw. verschobene Wegpunkte im Endanflug aufgrund der geringen lateralen und vertikalen Abstände zum Gelände bei diesem Anflug katastrophale Folgen.



## 2.2 Auf räumlichen Daten basierende Avionikssysteme

Nicht nur Avionikssysteme zur RNAV-Flugführung, sondern auch andere Avionikssysteme mit Warn- oder Flugführungsfunktion nutzen digitale aeronautische Daten zur Abbildung von räumlichen Informationen. Unter räumlicher Information wird in diesem Rahmen jegliche Information verstanden, welche existierende (z.B. die Geländeoberfläche, Flughäfen, Navigationseinrichtungen) oder imaginäre räumliche Phänomene (z.B. Wegpunkte) abbildet.

Durch den ständigen Abgleich mit der aktuellen Position, welche von Navigationssystemen geliefert wird, lassen sich Steuerkommandos oder Warnhinweise erzeugen, um potentielle Konfliktsituationen zu vermeiden oder zu lösen. Verallgemeinert bestehen diese Systeme aus drei Komponenten: Einer Onboard-Datenbank, welche anwendungsspezifische digitale aeronautische Daten enthält, einem Navigationssystem, welches Daten aus einer bzw. mehreren Navigationssensoren verarbeitet und die aktuelle Flugzeugposition liefert, sowie einer Kommando- bzw. Anzeigekomponente, welches die manuelle oder automatische Steuerung des Luftfahrzeuges zulässt.



Quelle: Eigene Grafik / FSR

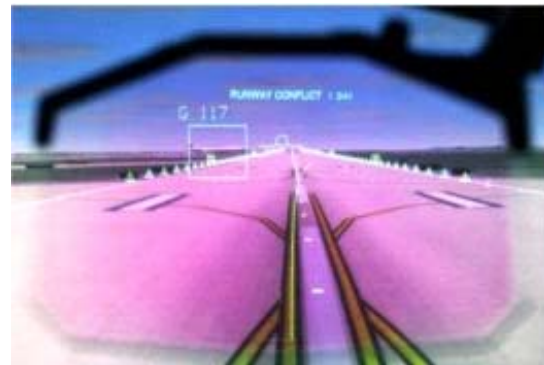
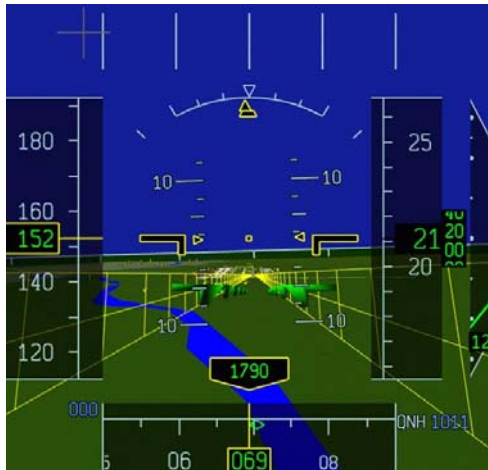
Abbildung 9: Komponenten von auf aeronautischen Daten basierenden Avionikssystemen

Im Folgenden sind exemplarische Avionikssysteme aufgeführt, welche digitale aeronautische Daten zur Abbildung von räumlichen Strukturen bzw. Informationen enthalten. Die Avionikssysteme lassen sich in Flugführungs- und Warnsysteme unterscheiden, welche wiederum je nach Anzeigemedium (Head-Down Anzeige, Head-Up Anzeige) und je nach gewählter Projektion (2D-Planview Projektion, 3D perspektivische Projektion) unterschieden werden können.

2-D Planview-Projektionen nutzen klassische kartographische Prinzipien. Sie generieren die visuelle Komponente der Anzeige aus einer räumliche Information enthaltenden Datenbank unter Auswertung der horizontalen Informationskomponente.

3-D Projektionen werden insbesondere für Synthetic Vision Systems (SVS) genutzt, welche die Darstellung von aus räumlichen Datenbanken (wie z.B. Flughafendatenbanken) generierten Bildern mit hohem räumlichen Übereinstimmungsgrad in zwei verschiedenen Bereichen ermöglichen:

1. *3D-Head-Down Display*:  
3-dimensionale Darstellung von räumlichen Phänomenen (z.B. des umgebenden Geländes und/oder des Sollflugpfades)
2. *Stereoskopisches Head-Up Display (HUD)*:  
Kontaktanaloge Anzeige von räumlichen Phänomenen.



Quelle: ([http://avsp.larc.nasa.gov/images/runway\\_inc\\_display.jpg](http://avsp.larc.nasa.gov/images/runway_inc_display.jpg), 21.01.2004

Abbildung 10: SVS Flugführungsanzeigen (links 3D-SVS für PFD (FSR, TU-Darmstadt), rechts Stereoskopisches HUD des NASA Runway Incursion Prevention System (RIPS))

### 2.2.1 FMS mit Onboard-Navigationsdatenbanken

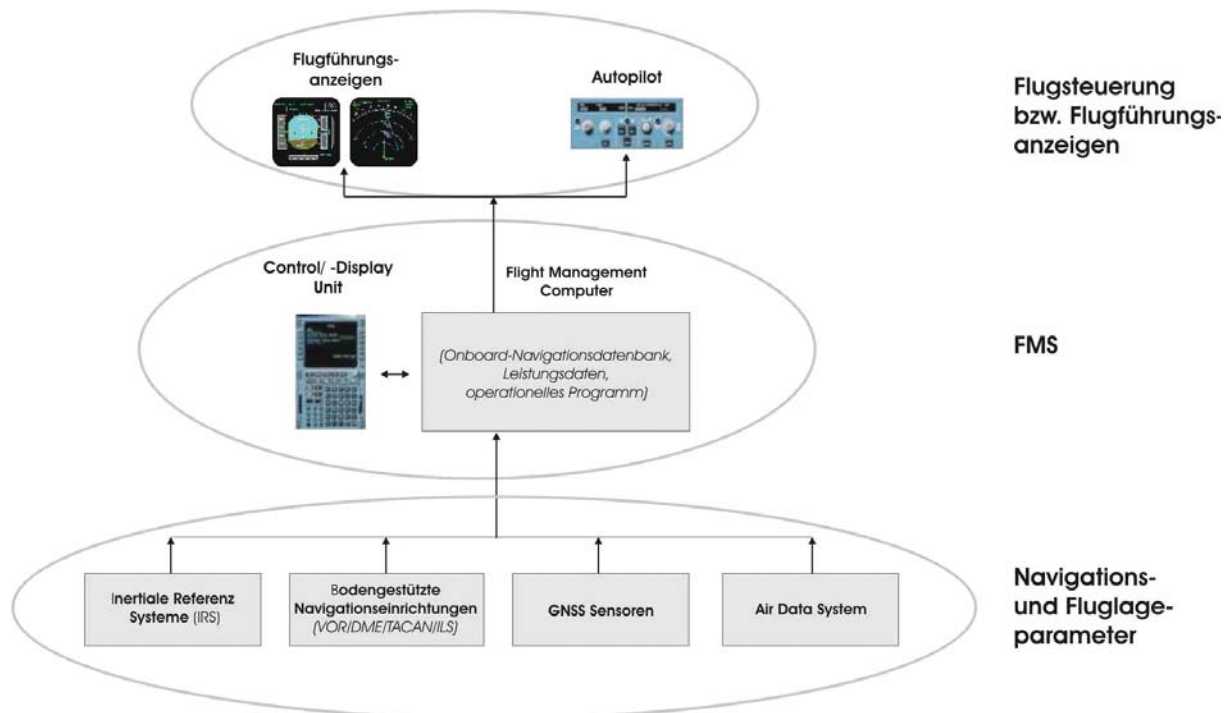
Die bordseitigen technischen Voraussetzungen zur Umsetzung von RNAV und RNP wurden maßgeblich mit der Entwicklung bordgestützter Flugnavigationssysteme (FNS) geschaffen. Ein FNS berechnet mittels bordgestützter INS, boden- bzw. satellitengestützten Navigationseinrichtungen sowie einer Onboard-Navigationsdatenbank die Flugzeugposition und kann eine in der Onboard-Navigationsdatenbank gespeicherte Route abfliegen, wie gemäß dem RNAV-Konzept gefordert. Das FNS kann sowohl mit dem Autopiloten als auch mit Flugführungsanzeigen gekoppelt werden. Die Onboard-Navigationsdatenbank enthält sowohl räumliche Koordinaten, Kennung und Frequenzen von bodengestützten Funknavigationseinrichtungen (VOR, DME, NDB, ILS,) als auch Wegpunkt-Koordinaten und deren Sequenz zur Definition von Flugrouten inklusive An- und Abflugverfahren, sowie weitere räumliche und nichträumliche Informationen zu Luftstraßen, Flugräumen und Flughäfen. Die DC-10 war Anfang der 70er Jahre eines der ersten Flugzeuge, auf dem eine Navigationsdatenbank im Rahmen des Area Navigation System ANS70 benutzt wurde [Gro1991].

Das FNS wurden später in das Flight Management Systems (FMS) integriert, welches erweiterte Funktionalität zur Berechnung der vertikalen Flugbahn und der Geschwindigkeit basierend auf flugzeugtypspezifischen Leistungsparametern besitzt. FMS gehören heute zur Standardausrüstung aller größeren kommerziellen Flugzeugtypen und setzen sich auch bei kleineren kommerziell genutzten Flugzeugtypen immer mehr durch. Zur RNAV-Flugführung sind sie unverzichtbar.

Ein FMS besteht aus den Komponenten Bordrechner (Flight Management Computer) und Bedien- und Anzeigegerät (Control- / Display Unit). In internen Speichern enthält der Flight Management Computer die Onboard-Navigationsdatenbank, die flugzeugspezifischen Leistungsdaten sowie die Betriebssoftware. Das FMS besitzt mehrere Schnittstellen zum Einlesen von Navigations- und Fluglageparametern sowie Ausgänge zur Ausgabe von



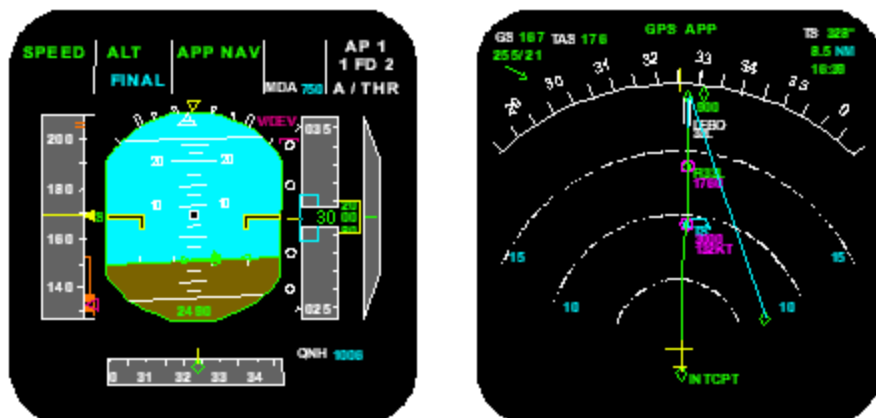
Flugführungsanzeigen und -kommandos auf Cockpitanzeigen bzw. zur Flugsteuerung auf den Autopiloten [Juk2004].



Quelle: Eigene Grafik

Abbildung 11: Komponenten eines *Flight Management Systems* (FMS)

Zum Visualisieren der durch das FMS berechneten bzw. gespeicherten Flugführungsparameter werden im wesentlichen zwei Flugführungsanzeigen genutzt: Das *Primary Flight Display* und das *Navigation Display*.



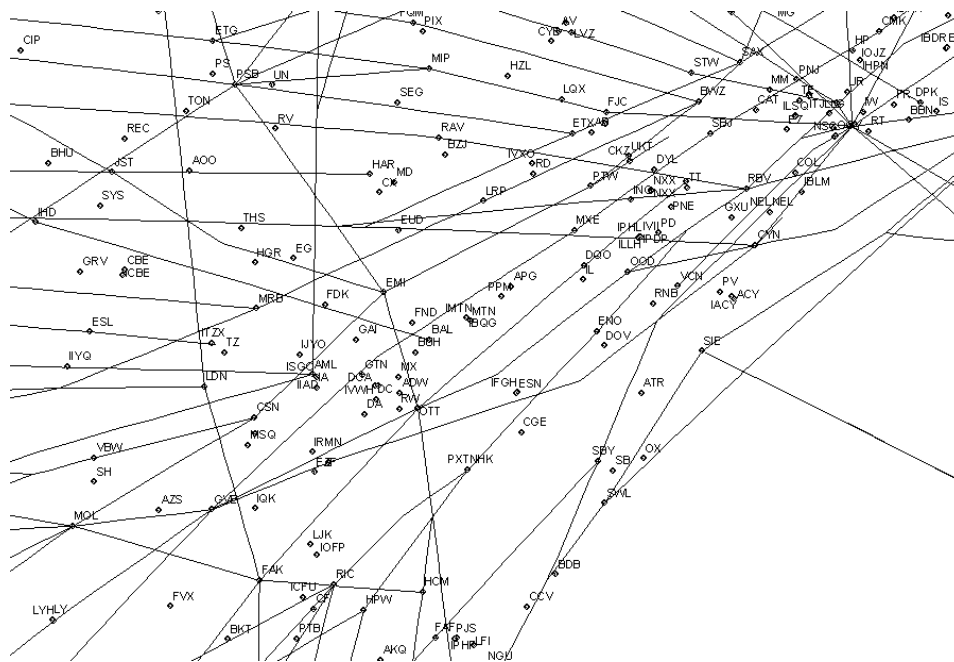
Quelle: [Imp2004]

Abbildung 12: PFD (links) ND (rechts) des Airbus 320

Das *Navigation Display* (ND) ist die Anzeigekomponente des FMS im Cockpit zur strategischen lateralen Navigation und bietet unter anderem eine 2-dimensionale Darstellung des lateralen Flugpfades, Wegpunkte, Flughäfen sowie der in der Umgebung befindlichen bodengestützten Navigationseinrichtungen. Das *Primary Flight Display* (PFD) kann neben Fluglageparametern auch vom FMS berechnete Flugführungskommandos zur taktischen lateralen und vertikalen Navigation darstellen [Juk2004]

FMS sind ursprünglich als „*supplementary means of navigation*“ entworfen worden. Sie wurden anfangs nur Enroute in großen Höhen zur lateralen und vertikalen Navigation bzw. beim An- und Abflug lediglich zur lateralen Navigation genutzt. Heute werden FMS vermehrt auch zur vertikalen Navigation während aller Flugphasen inklusive der kritischen An- und Abflugphasen als „*sole means of navigation*“ genutzt [TPC1997].

In der *Onboard*-Navigationsdatenbank eines FMS sind für ein bestimmtes Einsatzgebiet räumliche Daten von spezifischen Flugrouten, Wegpunkten und Navigationshilfen gespeichert. Mittels der in der Navigationsdatenbank gespeicherten diskreten Punktinformation (geographische Koordinaten), deren Relationen (Information, wie einzelne Wegpunkte operationell logisch verknüpft sind) sowie beschreibenden Daten (z.B. die Kennung einer Funknavigationseinrichtung oder eines Flughafens) können Flugrouten modelliert werden.



Quelle: [Do201a]

Abbildung 13: Inhalt einer *Onboard*-Navigationsdatenbank

Die Onboard-Navigationsdaten, welche im FMS zur Definition des vertikalen und lateralen Sollflugpfades und zur Positionsbestimmung genutzt werden, besitzen aufgrund der zunehmenden Nutzung von FMS zur lateralen und vertikalen Flugführung im Rahmen von RNAV insbesondere in den An- und Abfluphasen sicherheitskritischen Charakter. Je geringer der vorgesehene Abstand des Flugzeuges zu Gelände, Hindernissen und anderen Luftfahrzeugen, desto höher sind die Qualitätsanforderungen an die verwendeten aeronautischen Daten. Dies gilt insbesondere für RNAV-basierte Anflugverfahren, die eine hohe Positionsgenauigkeit erfordern (RNP 0.3 oder geringer). Datenfehler wie z.B. ein falscher Waypoint oder Pathterminator könnten zur Fehlführung mit katastrophalen Auswirkungen führen.

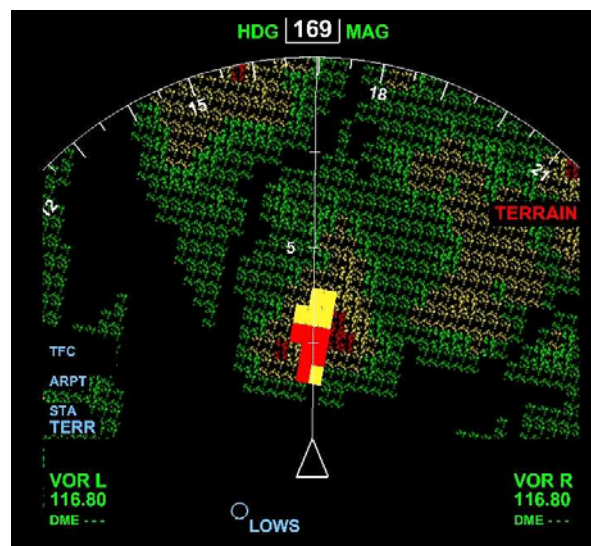
### 2.2.2 Gelände- und Hindernisdatenbanken nutzende TAWS und VSD

Die Kollision mit Gelände (*Controlled Flight into Terrain* - CFIT). zählt insbesondere seit der Einführung des Instrumentenfluges zu einer der Hauptunfallursachen der Luftfahrt. CFIT ist definiert als „jegliche Kollision mit Gelände oder Wasser, bei welcher der Pilot das Flugzeug zwar unter voller Kontrolle hatte, sich jedoch nicht seiner Flughöhe, der Geländehöhe oder

seiner lateralen Position bewusst war“ [Vol1997]. 2002 wurde CFIT als die häufigste Unfallursache sowohl für kommerzielle als auch für private Flüge identifiziert [Fli2004].

Zur Vermeidung von CFIT wurden zunächst das auf Radarhöhenmesser basierende *Ground Proximity Warning Systems* (GPWS) entwickelt. Das GPWS analysiert die vom Radarhöhenmesser gelieferte Bodenabstandsinformation und die flugphasenabhängige Flugzeugkonfiguration, um den Piloten vor einer unplanmäßigen Bodenannäherung zu warnen. Die Warnung wird in Form von akustischen Meldungen generiert. Unmittelbare Reaktion auf eine GPWS-Warnung ist in der Regel ein vertikales Ausweichmanöver. Eine laterale Ausweichempfehlung kann vom System nicht gegeben werden, da der Radarsensor nur in einem engen Winkel nach unten ausgerichtet ist und umliegendes Gelände nicht erfassen bzw. analysieren kann. Infolge dessen geschahen einige CFIT-Unfälle trotz GPWS-Warnungen wegen mangelndem räumlichen Situationsbewusstseins der Piloten während lateralen Ausweichmanövern, die auf ein vertikales Ausweichmanöver folgen. Um das räumliche Situationsbewusstsein auch bezüglich der lateralen Komponente zu verbessern, wurden auf Onboard-Gelände- und Hindernisdatenbanken gestützte Warnsysteme entwickelt, so genannte Terrain Alert and Warning Systeme (TAWS) und Vertical Situation Display (VSD).

Ein TAWS nutzt vorhandene Navigationssensoren zur Ableitung der lateralen und vertikalen Position des Flugzeuges sowie die FMS-Onboard-Navigationsdatenbank und eine digitale Gelände- und Hindernisdatenbank zur Abbildung des Geländes bzw. der Hindernissituation relativ zur aktuellen Flugzeugposition. Durch ständigen Abgleich der aktuellen Flugzeugposition mit der in der Gelände- und Hindernisdatenbank gespeicherten Höheninformation kann das TAWS eine potentielle Kollisionsgefahr im Voraus berechnen und durch visuelle Darstellung im ND und mittels akustischer Meldungen die Crew rechtzeitig warnen [Juk2004]. Durch Darstellung des umgebenden Geländes im ND wird ebenso eine Entscheidungshilfe zur Wahl eines potentiellen vertikalen und lateralen Ausweichmanövers geboten:

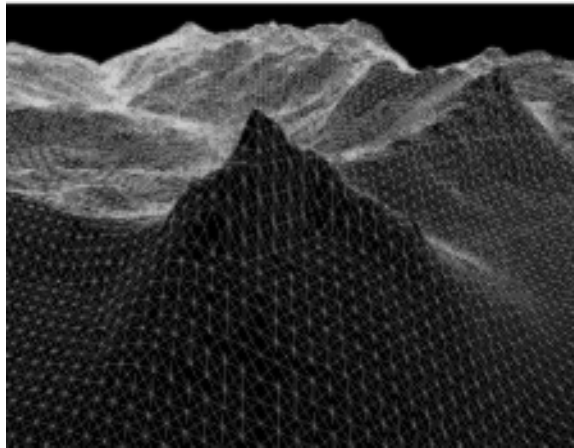


Quelle: [Dis2004]

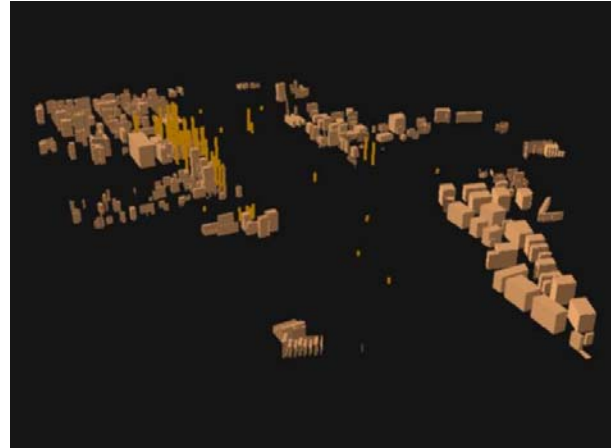
Abbildung 14: Visuelle TAWS-Warnung (rote und gelbe Felder) beim simulierten Abflug von Salzburg mit Darstellung des umgebenden Geländes, basierend auf einer Gelände- und Hindernisdatenbank

So kann der Pilot aus der in Abbildung 14 dargestellten Geländewarnung ableiten, dass ihm ein Ausweichmanöver nach links deutlich mehr Spielraum lässt als nach rechts, wo das Gelände stärker ansteigt. Inhalt und Aufbau einer Gelände- und Hindernisdatenbank unterscheidet sich stark von dem einer Onboard-Navigationsdatenbank. Während eine digitale Geländedatenbank in der Regel in Form eines gleichmäßigen Gitternetzes

angeordnete Geländehöhen enthält, welche die kontinuierliche Erdoberfläche modellieren, enthält eine digitale Hindernisdatenbank eine Reihe von räumlich diskreten Einzelpunkten, mit zugewiesenen Höhenwerte, über die Luftfahrthindernisse modelliert werden können. Die im TAWS genutzte Gelände- und Hindernisdatenbank kann in einer 3-D Projektion wie folgt visualisiert werden:



Geländedatenbank (Matterhorn, Schweiz)

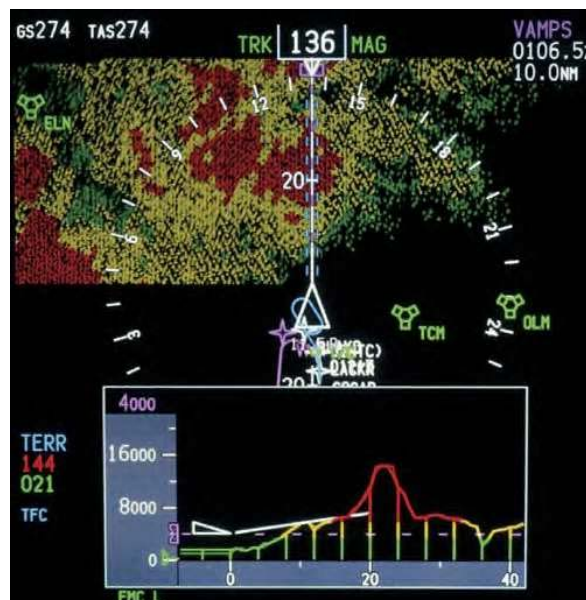


Hindernisdatenbank (Reno, Nevada)

Quelle: FSR

Abbildung 15: Gelände- und Hindernisdatenbank zur Nutzung in einem TAWS

Das VSD wird in der Regel als Erweiterung des TAWS angeboten und stellt den vorausgeplanten vertikalen Flugweg des Luftfahrzeuges und einen vertikalen Schnitt durch das darunter liegende Gelände dar. Die hierzu benötigte Flugweginformation wird aus dem FMS bezogen; die Geländeoberflächeninformation wird aus der Onboard-Geländedatenbank bezogen. Das angezeigte Geländeprofil kann bei gekrümmten Anflügen vorausschauend in der Drehrichtung des Luftfahrzeuges erzeugt werden, um der Crew erweitertes vertikales Situationsbewusstsein beim Kurvenflug zu bieten [Juk2004]:



Quelle: [Ds2004]

Abbildung 16: TAWS mit unterlegtem VSD beim simulierten Anflug auf Mt. Rainier

Auch Onboard-Gelände- und Hindernisdatenbanken, welche in TAWS und VSD genutzt werden, haben aufgrund ihrer Bedeutung für die fehlerfreie Nutzung des Warnsystems

sicherheitskritischen Charakter. Datenfehler wie z.B. falsche Höhen und fehlende Hindernisse können zu Fehlalarmen führen, welche zur Verunsicherung der Crew beitragen oder zum Ausbleiben des Alarms führen und hierdurch potentielle CFIT-Gefahr verursachen.

Ebenso wie bei Onboard-Navigationsdatenbanken spielt daher die Datenqualität der Onboard-Gelände- und Hindernisdatenbanken eine zentrale Rolle zur effizienten Nutzung der Systeme.



## 3 Herleitung der Notwendigkeit von Qualitätsmanagement für sicherheitskritische Luftfahrt Daten

### 3.1 Evolution des Qualitätsmanagements für Luftfahrt Daten

Im Rahmen des Annex 15 [ICAO15] regelte die International Civil Aviation Organization (ICAO) 1953 die Verantwortlichkeit für die Erstellung und Veröffentlichung von Luftfahrt Daten. Das Zusammenstellen, Speichern, Aktualisieren sowie die Verteilung von Luftfahrt Daten liegt demnach im Verantwortungsbereich der nationalen Aeronautical Information Services (AIS), welche in der Regel innerhalb der nationalen Luftfahrtbehörden angesiedelt sind [EEC1994].

*„The collection and distribution of aeronautical information for use by all types of aircraft operations is the responsibility of the AIS of a State, as specified in Annex 15 [...]”*  
[ICAO8126]

Kern der nationalen Publikation eines AIS ist die Aeronautical Information Publication (AIP). In der AIP müssen für ein Staatsgebiet

- Flughafenkarten und Flughafenhinderniskarten
- Präzisions-Anflugkarten mit Geländeinformation
- Anflug- und Abflugkarten für Instrumentenflugverfahren und visuelle Navigation
- Area Charts

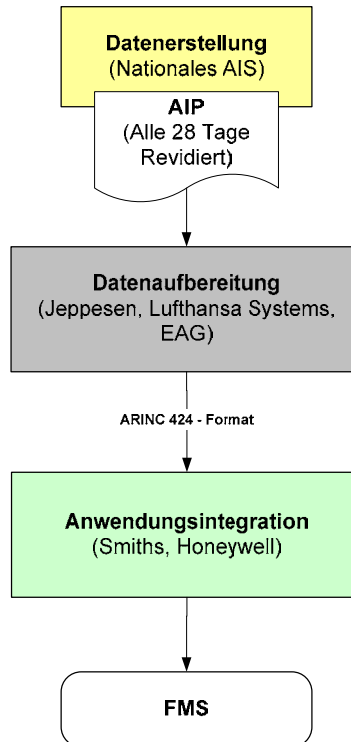
veröffentlicht werden [ICAO15].

Die Datenqualitätsanforderungen hierfür sind im Rahmen von ICAO Annex 4 (Aeronautical Charts) [ICAO4], Annex 11 (Air Traffic Services) [ICAO11], Annex 14 (Aerodromes) [ICAO14] und Annex 15 (Aeronautical Information Services) [ICAO15] definiert. Die Verantwortung zur Gewährleistung der erforderlichen Datenqualität liegt bei dem zuständigen Staat:

*“The State concerned shall remain responsible for the information published”*  
[ICAO15]

Zum Erstellen von Onboard-Navigationsdatenbanken werden die benötigten Navigationsdaten von kommerziellen Datenaufbereitungsfirmen (wie z.B. Jeppesen, Lufthansa Systems, EAG) zunächst aus nationalen AIPs abgeleitet und über mehrere Zwischenschritte in ein vom FMS-Hersteller lesbares Standardformat gemäß Industriestandard ARINC424 umgewandelt. Der FMS-Hersteller integriert die Daten, wandelt sie in ein anwendungsspezifisches Format und führt sie auf Tapes, Kassetten oder Disketten dem FNS/FMS zu [Gro1991].

Änderungen müssen gemäß den von der ICAO festgelegten AIRAC-Zyklen bereits im Voraus in den AIPs veröffentlicht werden, um genügend Spielraum zur Datenaufbereitung und Datenverteilung auf die Luftfahrzeuge zuzulassen (AIRAC 28, 56, 112). Hierdurch soll sichergestellt werden, dass publizierte Änderungen bereits in die Onboard-Navigationsdatenbank integriert sind, wenn die Änderung in Kraft treten. Kurzfristige und temporäre Änderungen werden durch diesen Prozess nicht berücksichtigt; sie werden im Rahmen von Notices for Airmen (NOTAMS) alle 6 Stunden veröffentlicht und müssen vor dem Flug direkt an den Piloten weitergeleitet werden.



Quelle: Eigene Grafik

Abbildung 17: Datenzyklus FMS Onboard-Navigationsdatenbank

Die im Rahmen von ICAO Annex 4, 11, 14 und 15 definierten Datenqualitätsanforderungen waren ursprünglich für die Erstellung von Luftfahrtkarten ausgelegt, welche wiederum als Quelldaten für Onboard-Navigationsdatenbanken dienen. Diese definierten Datenqualitätsanforderungen der Quelldaten (AIP) sind zwar ausreichend, um die abgeleiteten Onboard-Navigationsdatenbanken für RNAV-Enroutenavigation nutzen zu können. Mit der Einführung von satellitengestützten Landesystemen sowie positionskritischen P-RNAV für An- und Abflugverfahren mussten jedoch neue Datenqualitätsanforderungen für die Veröffentlichung von Wegpunkten, welche An- und Abflugpfade definieren, festgelegt werden [DFSQS3].

Da die in ICAO Annex 4, 11, 14 und 15 definierten Datenqualitätsanforderungen sich lediglich auf die Publikation der Daten in der AIP beziehen, für alle darauf folgenden Prozesse (Datenaufbereitung, Anwendungsintegration) jedoch bis 1997 keine international gültigen Qualitätssicherungsaufgaben bestanden, wurde demnach mehr als 20 Jahre aeronautische Daten ohne einheitliches, international gültiges Qualitätssicherungskonzept zur Enroute-Navigation genutzt [TPC1997].

Erst mit einer Modifikation des ICAO Annex 15, der Einführung von WGS-84 als global einheitlichem horizontalem Referenzsystem für aeronautische Daten und insbesondere der Veröffentlichung der Industriestandards Do-200a/ED-76 und Do201/ED-77 wurden grundlegende Vorgaben zur Qualitätssicherung von Luftfahrt Daten zur Nutzung in Navigationssystemen definiert und die Qualitätsanforderungen an die Nutzungsanforderungen angepasst [TPC1997]. Der sicherheitskritischen Bedeutung von Luftfahrt Daten zur FMS-gestützten RNAV-Flugdurchführung wurde hiermit von der regulativen Seite her Rechnung getragen.



### 3.2 Die LuftfahrtDatenkette nach RTCA Do-200a

Der Industriestandard RTCA Do-200a enthält Richtlinien für ein Qualitätssicherungskonzept zur Verarbeitung von LuftfahrtDaten für Flugnavigationsanwendungen. Er umfasst die Bereiche der Datenerstellung, Datenintegration und Anwendungsintegration [Do200a] und listet Anforderungen auf, die zur Entwicklung, Modifizierung und zur Implementierung von Qualitätssicherungsmechanismen im Rahmen eines Lebenszyklus eingehalten werden müssen, um die erforderliche Qualität der Daten für den Endnutzer zu gewährleisten:

*“It provides a recommended minimum standard for the processing of aeronautical data. It is applicable to all phases of the aeronautical data process, from origination through acceptance and application by the end-user. It also includes quality assurance and quality management issues.” [Do200a]*

Ein auf der Do-200a basierender Lebenszyklus soll sicherstellen, dass Daten für Luftfahrtanwendungen alle benötigten Eigenschaften besitzen, um ihre vorgesehene Funktion erfüllen zu können. Daten, welche die benötigten Eigenschaften nicht besitzen, können Fehlfunktionen bei ihrer Anwendung verursachen und – je nach Kritikalität der Anwendung - schlimmstenfalls zu katastrophalen Unfällen mit dem Verlust von Menschenleben führen.

Von der rechtlichen Seite liegt gemäß DO-200A die Verantwortung für zur Gewährleistung der erforderlichen Datenqualität beim Endnutzer:

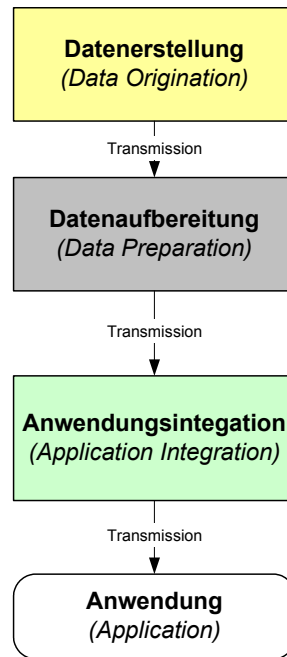
*“The ultimate responsibility of ensuring that data meets the quality for its intended application rests with the end-user of that data.” [DO-200A].*

In den meisten Fällen kann der Endnutzer (der Pilot) jedoch eine vollständige Überprüfung aller Daten auf mögliche Fehler nicht gewährleisten, da er weder über die nötigen technischen Mittel, das entsprechende Wissen und die Zeit hierzu verfügt. Daher verlässt sich der Endnutzer in der Regel auf die Do-200a Akkreditierung des Datenlieferanten und Anwendungsintegrators.

Nach RTCA Do-200a wird ein LuftfahrtDaten-Lebenszyklus durch eine Luftfahrt-Datenkette (Aeronautical Data Chain) modelliert [Do200a]. Sie bildet den Weg von Datenelementen von der Erstellung bis zur Anwendung im Avioniksystem ab. Jedes Kettenglied der Luftfahrt-Datenkette ist mit dem darauf folgenden Kettenglied logisch verbunden. Die zur Flugnavigationsanwendung genutzte, aus einer Vielzahl von einzelnen Datenelementen bestehende Information kann aus einer einzigen LuftfahrtDatenkette stammen oder aus mehreren verschiedenen Datenketten zusammengestellt sein:

*„An “Aeronautical Data Chain” is a conceptual representation of the path that a set, or element, of aeronautical data takes from its creation to its end use. With an aeronautical data chain, as in a physical chain, each link is connected to its adjacent links. The symbolic links that make up an aeronautical data chain may be as broad as organizations or departments within organizations, or, as refined as individuals or specific equipment. [...]. Many different aeronautical data chains may contribute to a collection of data that is used by an end-user.” [Do-200a]*

Als Kettenglieder der Luftfahrt-Datenkette werden in Do-200a die Datenerstellung, Datenaufbereitung, Datenintegration und Anwendung identifiziert, die logisch miteinander verknüpft sind. Die Datenübertragungsfunktion (*Transmission*) repräsentiert die Schnittstelle zwischen den einzelnen Kettengliedern:



Quelle: Eigene Grafik

Abbildung 18: Kettenglieder einer Luftfahrt-Datenkette [Do200a]

Die *Datenerstellung* umfasst das Generieren aeronautischer Daten. Je nach Datentyp stehen verschiedene Methoden und Technologien zur Datenerstellung zur Auswahl, wie z.B. Vermessung und Berechnung. Die Auswahl der geeigneten Methode muss in Bezug auf die von der Anwendung geforderten Datencharakteristika und Datenqualität erfolgen.

Die *Datenaufbereitung* umfasst die Weiterverarbeitung von aeronautischen Daten, wie die Konvertierung von Information von einem analogen in ein digitales Format (z.B. die Abbildung gedruckter AIP-Information in einer Datenbank), bzw. die Konvertierung zwischen digitalen Formaten, die Datengeneralisierung und die Selektion bestimmter Information basierend auf räumlichen oder anwendungsspezifischen Filtern.

Die *Anwendungsintegration* umfasst das Aufbereiten von aeronautischen Daten aus einem Standardformat in ein anwendungsspezifisches Format. Anwendungsspezifische Dateneigenschaften, wie z.B. Datenformat, werden im Rahmen der Anwendungsintegration bereitgestellt.

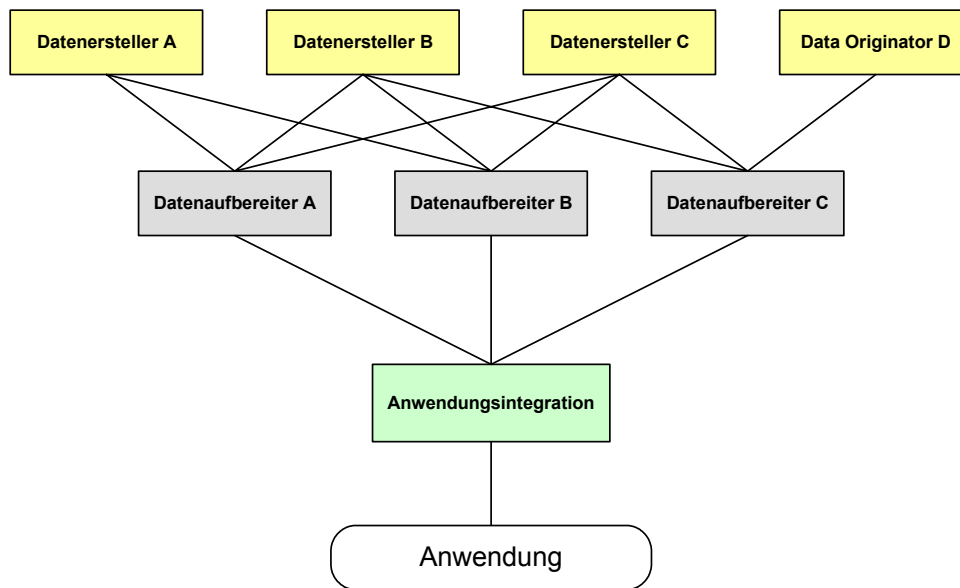
Die *Anwendung* schließlich umfasst die Nutzung der aeronautischen Daten im Rahmen eines Avioniksystems. Im Gegensatz zu allen anderen Kettengliedern werden bei der Anwendung die Daten nicht dauerhaft modifiziert, sondern lediglich eingelesen. Damit unterscheidet sich dieses Glied wesentlich von den anderen drei Kettengliedern.

Im Rahmen der Luftfahrt-Datenkette nimmt die Datenerstellung eine Sonderrolle ein. Die bei der Datenerstellung erzielte Datenqualität kann in den folgenden Kettengliedern in der Regel nicht mehr verbessert werden. Fehler bei der Datenerstellung werden durch die weiteren Kettenglieder durchgereicht und gelangen bis zum Anwender. Die Datenverarbeitung der zwischen der Datenerstellung und der Anwendung positionierten Kettenglieder folgt dem Motto „*Trash-In, Trash-Out*“, d.h. eingehende Datenfehler werden auch als solche weitergegeben. Hohe Kontextredundanz der Navigationsinformation und die Analyse von Navigationsdaten bezüglich Diskrepanzen erlaubt jedoch in gewissem Ausmaß das Aufdecken von Datenfehlern aus der Datenerstellung.

Die einzelnen Glieder einer Luftfahrt-Datenkette müssen nicht zwangsweise räumlich bzw. organisatorisch getrennt sein. Oftmals übernimmt eine einzige Organisation die Aufgabe

mehrerer Glieder; insbesondere die Datenaufbereitung und die Anwendungsintegration sind oft innerhalb einer Institution integriert.

Die Luftfahrt-Datenkette kann verschiedene Formen annehmen; sie muss nicht unbedingt einsträngig sein. Die Vollständigkeit der Daten in Bezug auf die geographische Abdeckung (eine bestimmte Region, mehrere Länder, global) und den benötigten Datentypen (z.B. Geländedaten, Hindernisdaten, Flughafendaten) kann bei der Datenerstellung, bei der Datenaufbereitung oder der Anwendungsintegration erreicht werden. In vielen Fällen ähnelt die Luftfahrt-Datenkette einer Baumstruktur, bei der Daten über mehrere Äste zur Anwendungsintegration geführt werden:



Quelle: Eigene Grafik

Abbildung 19: Luftfahrt-Datenkette, Baumtyp

Die Anforderungen bezüglich des Informationsgehalts und die Anforderungen an die Datenqualität müssen in Hinsicht auf die Anforderungen der Anwendung in der Regel durch den Avionikhersteller definiert werden. Von dort werden sie entlang der einzelnen Glieder bis hin zum Datenersteller weitergegeben. Die Anwendung beeinflusst hierdurch maßgeblich alle Prozesse der Luftfahrt-Datenkette.

Um sicherzustellen, dass sowohl der gewünschte Informationsgehalt als auch die benötigte Datenqualität für die Anwendung bereitsteht, müssen im Rahmen einer Luftfahrt-Datenkette eine Vielzahl von Prozessen zur Qualitätssicherung implementiert werden. Qualitätssicherungsmaßnahmen müssen in Form von dokumentierten Verfahren und Maßnahmen ausgearbeitet und im Rahmen der Luftfahrt-Datenkette umgesetzt werden. Kann durch die dokumentierten Verfahren die erforderlichen Eigenschaften der Daten gewährleistet werden, muss sichergestellt werden, dass die Verfahren bei jeder Wiederholung des Prozesses auch immer identisch angewandt werden. Bei Abweichungen der Dateneigenschaften von den geforderten Eigenschaften müssen Maßnahmen zum Beheben der Abweichung zur Verfügung stehen. Dies kann durch ein Qualitätssicherungssystem gewährleistet werden.

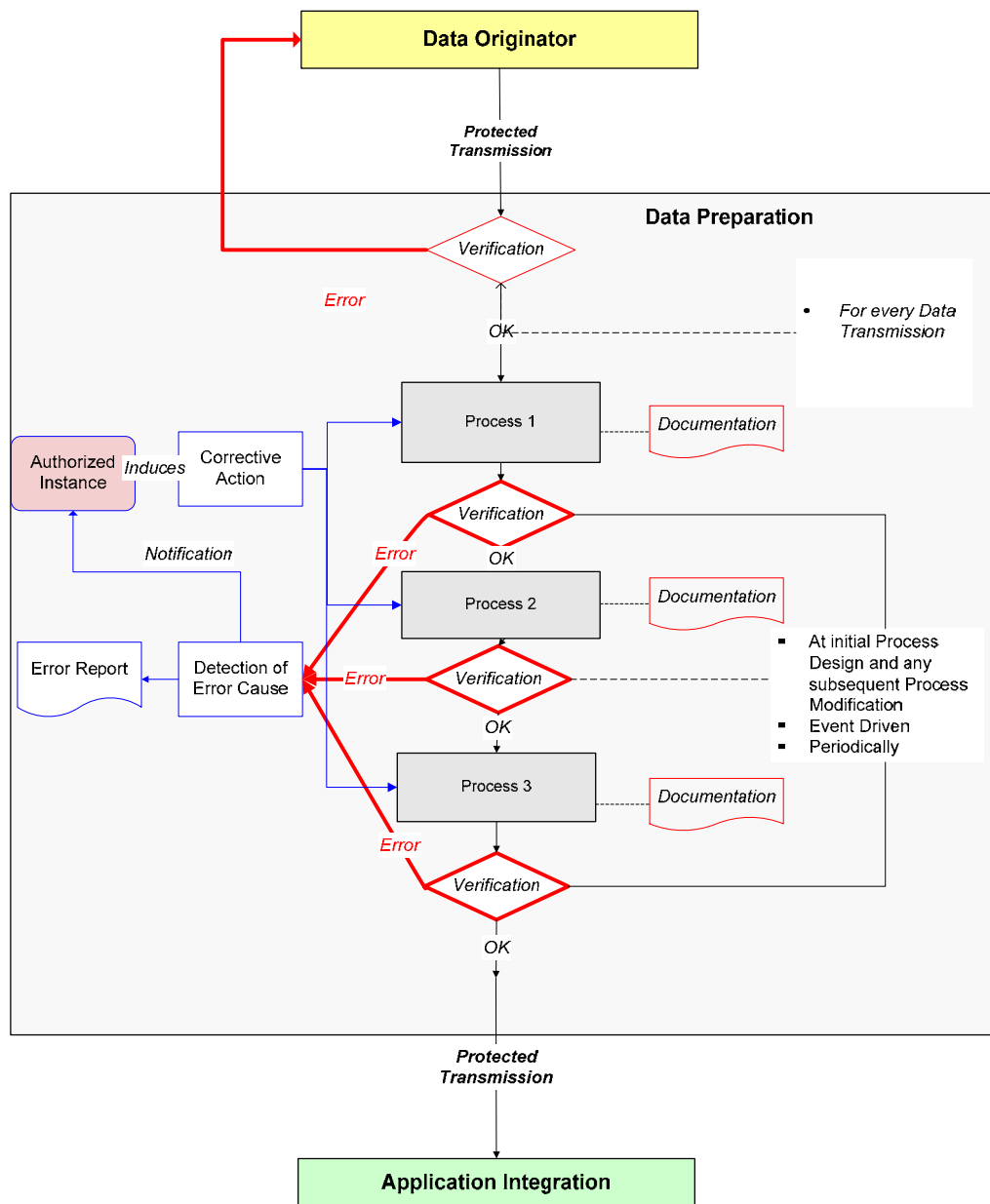
Ein wichtiger Bestandteil des Qualitätssicherungskonzepts für Navigationsdaten nach Do-200a ist das Verifizieren und Validieren, insbesondere bei Übernahme von einem

vorgelagertem Kettenglied in Bezug auf die definierte erforderliche Datenqualität und andere Dateneigenschaften:

*“When the achievement of the data quality depends upon the quality of data obtained from a previous participant, then either the data accepted from the previous participant must be validated to the required level, or an assurance of data quality must be sought from that previous participant”*

[DO200A]

Wird beim Verifizieren der Daten festgestellt, dass die vorab definierten Dateneigenschaften nicht eingehalten wurden, muss die Fehlerquelle identifiziert und korrektive Maßnahmen eingeleitet werden, sowie Koordinationsmaßnahmen mit vorherigen und nachfolgenden Gliedern initiiert werden. Wird die Verifizierung sowie daraus folgende Korrekturmaßnahmen in die Prozesse des Kettengliedes Datenaufbereitung integriert, ergibt sich folgendes Bild:



Quelle: Eigene Grafik

Abbildung 20: Datenaufbereitung mit Qualitätssicherungsmaßnahmen

### 3.3 Status Quo der Datenqualität aeronautischer Daten

*„The quality of aeronautical information provided to operators and crews is substantially below the [level defined by the International Civil Aviation Organization's] adopted standards and recommended practises [...]“ [Fli2006]*

Umfangreiche Untersuchungen von EUROCONTROL zur Qualität des Datenerstellungs- und Publikationsprozesses in nationalen AIPs [ECC2003] und von *Transport Canada* zur Qualität des Datenaufbereitungs- und Anwendungsintegrationsprozesses [TPC1997] zeigten, dass die definierten Datenqualitätsansprüche zur Datenerstellung durch nationale AIS teilweise nicht erfüllt werden:

*“A number of studies jointly conducted by the AIS & NAV Domains of EUROCONTROL and placed in the public domain have demonstrated that the level of integrity of flight critical data is at best  $10^{-3}$ , substantially below the  $10^{-8}$  value required by ICAO Annex 15. A parallel study into flight data operations jointly conducted by the ATC & Data Processing Domain (ATC) and the Central Flow Management Unit (CFMU) of EUROCONTROL has demonstrated that inconsistency is a major source of concern.” [CAM2002]*

Zu den häufigsten festgestellten Fehlern bei der Datenerstellung zählen

- Inkonsistenz bezüglich Format und Auflösung von Daten
- Verschiedene Koordinaten für identische Wegpunkte in AIPs benachbarter Staaten
- Fehlende Koordinaten von Wegpunkten und Runway-Thresholds
- Inkonsistenzen bei der Beschreibung von Navigationseinrichtungen
- Inkonsistenzen bei der Nutzung von Längen- und Höheneinheiten

11,5% der untersuchten 25357 Datensätze nationaler AIPs beinhalteten zumindest eine Inkonsistenz [ECC2003]

Datenfehler bei der Datenerstellung und -veröffentlichung im Rahmen von nationalen AIPs können im Kettenglied der Datenaufbereitung und Anwendungsintegration zwar teilweise durch Kontext-Redundanzprüfungen detektiert und behoben werden [EEC1994]; nicht detektierte Fehler werden jedoch nach dem Trash-in-Trash-out-Prinzip bis in die Anwendung weitergegeben. Bei der Datenaufbereitung und Anwendungsintegration können zusätzliche Fehler durch menschliche Interaktion bei der Datenweiterverarbeitung hinzugefügt werden.

Bei der Datenaufbereitung und Anwendungsintegration zählen

- fehlende und zusätzliche, nicht veröffentlichte Flugverfahren
- inkorrekte Wegpunktbenennung
- zusätzliche oder fehlende Wegpunkte
- falsche Kursangaben
- sowie Inkonsistenzen bei der vertikalen Navigationsinformation

zu den häufigsten Datenfehlern [TPC1997].

Im Rahmen des Future Air Navigation Systems (FANS), einem international koordinierten Konzeptes für Flugplanung und Flugverkehrskontrolle im 21. Jahrhundert, welches auf Flugführungs- und Flugsicherungsverfahren mittels RNAV, RNP, Satellitennavigation und Datalink basiert, soll die Verantwortung zur Einhaltung der Mindestabstände zwischen Luftfahrzeugen, Gelände und Hindernissen verstärkt vom Fluglotsen auf den Piloten übertragen werden. Der Fluglotse hat nicht mehr flugführende, sondern vielmehr überwachende Funktion [Cla1997]. In diesem Rahmen wird die Nutzung von sicherheitskritischen Luftfahrt Daten zur Flugführung weiter zunehmen und damit die

Notwendigkeit der Implementierung von fundierten Qualitätssicherungsmaßnahmen zur Erstellung und Verarbeitung von Navigationsdaten steigen:

*„The provision of Aeronautical Information is, therefore, a core process that underpins all other elements of ATM. Present (and future) navigation and other ATM systems are data-dependent, all requiring access to global Aeronautical Information of a considerably higher quality and timeliness than is currently generally available.”*  
[CAM2002]

Auch im Rahmen der gegenwärtigen Umsetzung von RNAV-Flugverfahren ist die Weiterentwicklung und Umsetzung von Qualitätssicherungsverfahren für Navigationsdaten von äußerster Dringlichkeit, um die Flugsicherheit sicherstellen zu können.

Fehlerhafte Daten bzw. fehlerhafte Informationskonzepte können zu einer Kette von Fehlentscheidungen führen, welche letztlich zu einem Verlust von Menschenleben führen können, wie zwei Unfälle 1979 und 1995 zeigten:

1. Der Absturz einer Air New Zealand DC-10 1979 am Mount Erebus, Antarktis, mit 257 Todesopfern wurde laut Untersuchungsbericht verursacht durch ein unsachgemäßes Ändern eines Wegpunktes der Flugroute während der Flugplanung und durch das Fehlen einer Luftfahrtkarte, auf der die fehlerhafte Flugroute aufgefallen wäre. Durch den falschen Wegpunkt wurde die DC-10 1.5 nautische Meilen östlich vom korrekten Flugpfad unter Autopilot vom FMS in einen Berg gesteuert [ASN1979].
2. Bei dem Absturz einer American Airlines Boeing 757 in Cali, Kolumbien 1995 führte die Inkonsistenz der Namensgebung der analogen Anflugkarte und der FMS-Onboard-Navigationsdatenbank sowie mangelndes Situationsbewusstsein der Piloten zu einer Verkettung von Fehlern, welche schließlich in dem Totalverlust der Maschine und dem Tod von 160 Menschen endete. Fehlerschwerpunkt lag in unterschiedlichen Benamungskonzepten zwischen Anflugkarte und Onboard-Navigationsdaten:

Die Crew plante einen VOR DME Anflug auf Cali, Runway 19 (ROZO 1 Arrival) über das ROZO NDB. In der Anflugkarte war der Code für ROZO als „R“ dargestellt; entsprechend gab die Crew „R“ in das FMS ein, um im FMS-Lateral Navigation (NAV)-Modus ROZO zu selektieren und automatisch dorthin zu steuern. In der Onboard-Navigationsdatenbank war „R“ jedoch als Code für ROMEO gespeichert, einer 150 nautischen Meilen von ROZO entfernten Funknavigationseinrichtung. Die 757 startete eine Linkskurve und steuerte nun auf das 150 Meilen entfernte ROMEO, wodurch sie in gebirgiges Gelände geführt wurde. Die Crew schätzte wegen fehlenden räumlichen Situationsbewusstseins die Lage nicht korrekt ein, so dass die 757 schließlich an einem Berg zerschellte [ASN1995].

Im ersten Fall wurde der Fehler bei der Datenerstellung (der Flugplanung) erzeugt und in die Onboard-Navigationsdatenbank übertragen. Verifizierung der erzeugten Daten (z.B. in Form einer Überlagerung des Flugweges mit einer Luftfahrtkarte) hätte die fehlerhafte Planung aufgedeckt. Im zweiten Fall lag der Fehler bei Inkonsistenzen bezüglich der Vorschrift zur Abkürzung der Namen von Navigationseinrichtungen.

Für Flughafenkarten wurde 2003 im Auftrag der FAA eine Untersuchung der Zuverlässigkeit von Papierkarten für *Airport Operations* durchgeführt, deren Ziel es war, aus dem heutigen Zuverlässigkeitsniveau von (Papier-)Flughafenkarten Rückschlüsse auf das erforderliche Zuverlässigkeitsniveau für Flughafendatenbanken für elektronische *Airport Surface Moving Map Displays* (SMMD) zu ziehen [FAA2003]. Hierbei wurden für 8 ausgewählte Flughäfen Flughafenkarten von zwei Herstellern (Jeppesen und FAA/NACO) mit Flughafenplänen der Flughafenbetreiber verglichen und auf Unstimmigkeiten hin untersucht. Diskrepanzen wurden je nach operationeller Signifikanz in 3 Klassen (*Minor*, *Moderate* und *Major*) klassifiziert. Als *Major* wurden alle Fehler klassifiziert, welche potentiell zum Verlust des Situationsbewusstseins von Piloten beitragen können.

Hierbei traten folgende als *Major* klassifizierte Fehler besonders häufig auf:

- Fehlende Rollwege
- Gesperrte Rollwege werden als geöffnet symbolisiert
- Falsch benannte Rollwege
- Fehlende Gebäude auf dem Vorfeld
- Unbefestigte Flächen werden als befestigt und nutzbar ausgewiesen

[FAA2003].

Keiner der 8 untersuchten Flughäfen war bei einem Hersteller ohne Fehler:

- Jeppesen hatte im Durchschnitt 2,75 *Major* Fehler/Flughafenkarte (Standardabweichung 5,5)
- FAA/NACO hatte im Durchschnitt 9,5 *Major* Fehler/Flughafenkarte (Standardabweichung 15,7)

[FAA2003]

Die Anzahl der gefundenen Unstimmigkeiten, welche mit *Major* klassifiziert wurden, gibt Anlass zu Besorgnis [FAA2003].

Weil es sich bei der untersuchten Menge von Flughäfen nur um einen Bruchteil der Gesamtmenge aller weltweit angeflogenen Flughäfen handelt, stellt das Resultat nur einen „Schnappschuss“ der Zuverlässigkeit von Flughafenkarten an den untersuchten Flughäfen dar. Bezüglich des Trends decken sich die Ergebnisse mit denen der Untersuchung der *AIS & NAV Domains* von *EUROCONTROL* für *flight critical data* [CAM2002]





### 3.4 Fazit

Die in Kapitel 1.1 zitierten Untersuchungen zur Qualität von Navigationsdaten sowie Unfallberichte zeigen, dass trotz international verbindlicher formeller Anweisungen zur Qualitätssicherung von sicherheitskritischen Luftfahrtdaten wie RTCA Do-200a und ICAO Annex 15 die erforderliche Datenqualität nicht gewährleistet werden kann. Existierende Qualitätssicherungsverfahren müssen daher weiter verbessert werden, um die Flugsicherheit auch in Zukunft bei immer datenlastigeren Navigationsverfahren gewährleisten zu können.

In dieser Hinsicht ist auch der legale Aspekt bei der Bereitstellung von Luftfahrtdaten interessant:

Tragen unzuverlässige Luftfahrtdaten (in Karten- oder beliebiger anderer Form) zu einem Unfall/Zwischenfall bei, bei dem es zu Personen- oder Sachschaden kam, so kann der Geschädigte im Rahmen der Produkthaftung des Herstellers auf Schadensersatz klagen [FAA2003]. In diesem Rahmen kam es in den USA zu einer Reihe von Schadensersatzklagen gegen Luftfahrkartenhersteller. Die folgenden aufgeführten Fälle sind Beispiele, bei denen das Gericht den Luftfahrkartenhersteller für Schäden haftbar machte:

- *Reminga v. US*, 631 F.2d 449 (6<sup>th</sup> Cir. 1980)
- *Aetna Casualty and Surety Co. v. Jeppesen*, 642 F.2d 339 (9<sup>th</sup> Cir. 1981)
- *Salomey v. Jeppesen*, 707 F.2d 671 (2<sup>nd</sup> Cir. 1983)
- *Brockelsby v. U.S.*, 767 F.2d 1288 (9<sup>th</sup> Cir. 1985), *cert. denied* 474 U.S. 1101 (1986)

Aufgrund der Rechtslage ist also nicht nur aus sicherheitstechnischen, sondern auch aus ökonomischen Gründen eine Qualitätssicherung der Datenerstellung und -Revision für jedes Kettenglied einer Luftfahrtdatenkette von Interesse.

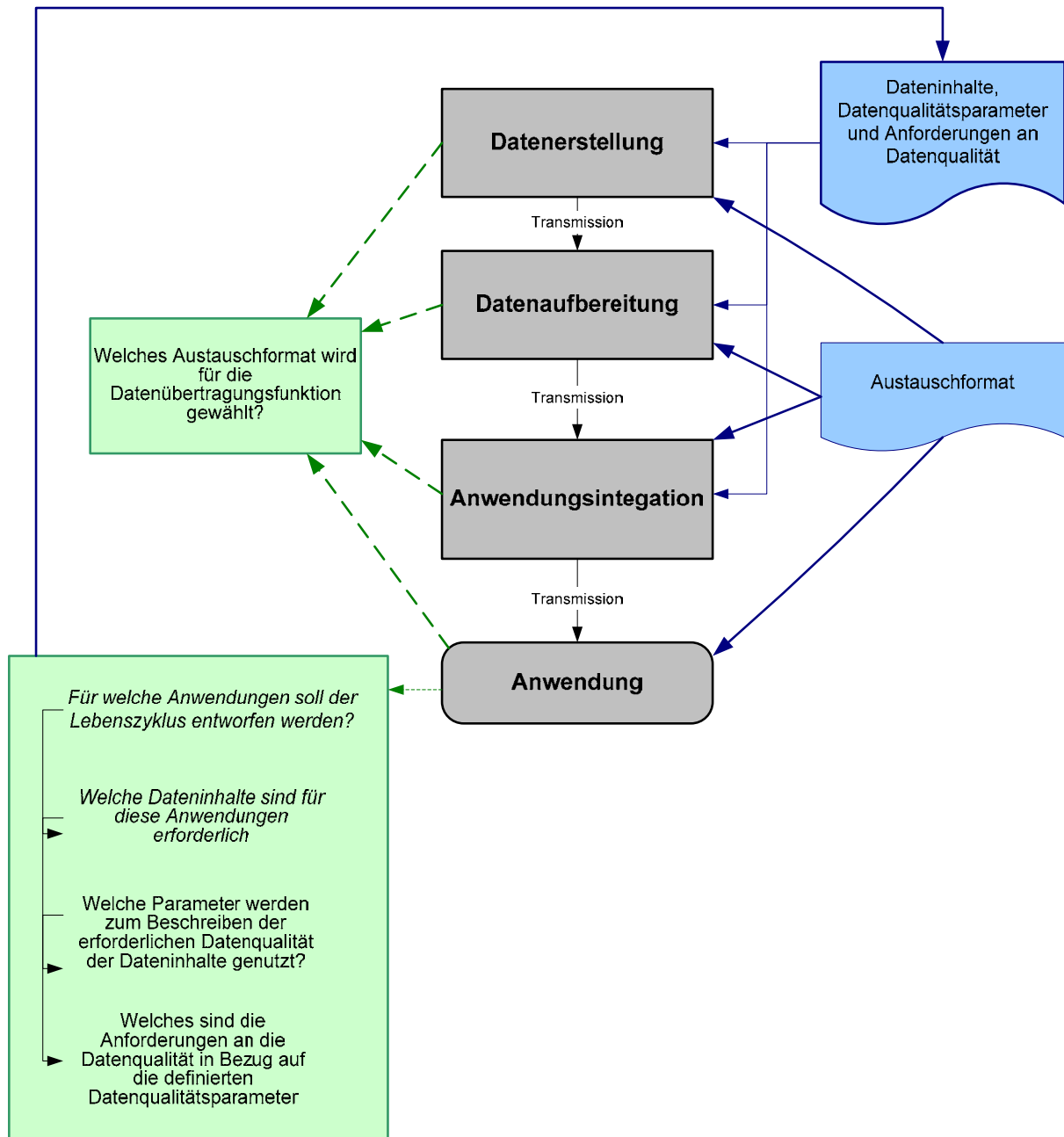


## **4   Rahmenparameter zur Entwicklung von Qualitäts-sicherungsmaßnahmen für Luftfahrt Datenketten**

Wie in Kapitel 1.1 beschrieben, wird der Lebenszyklus von Navigationsdaten für sicherheitskritische Luftfahrtanwendungen durch eine Luftfahrt-Datenkette beschrieben. Existierende Qualitätssicherungsmaßnahmen reichen teilweise nicht aus, um die benötigte Datenqualität sicherstellen zu können. Um adäquate Qualitätssicherungsmaßnahmen im Rahmen einer Luftfahrt Datenkette aufbauen zu können, müssen zunächst die Rahmenparameter einer Luftfahrt Datenkette ermittelt und definiert werden. Mittels einer Literaturanalyse von [Do201a][ICAO4][ICAO11][ICAO14] konnten vom Autor hierzu fünf Rahmenparameter isoliert werden, die zur Entwicklung einer Luftfahrt-Datenkette bekannt sein müssen:

1. Definition der Anwendung: Für welche Anwendungen soll der Lebenszyklus entworfen werden?
2. Dateninhalte: Welche Dateninhalte sind für diese Anwendungen erforderlich?
3. Parameter der Datenqualität: Welche Parameter werden zum Beschreiben der erforderlichen Datenqualität von Dateninhalten genutzt (wie z.B. Genauigkeit, Integrität)?
4. Anforderungen an die Datenqualität: Was sind die Anforderungen an die Datenqualität in Bezug auf die definierten Datenqualitätsparameter?
5. Austauschformat: Welches Austauschformat wird für die Datenübertragungsfunktion gewählt?

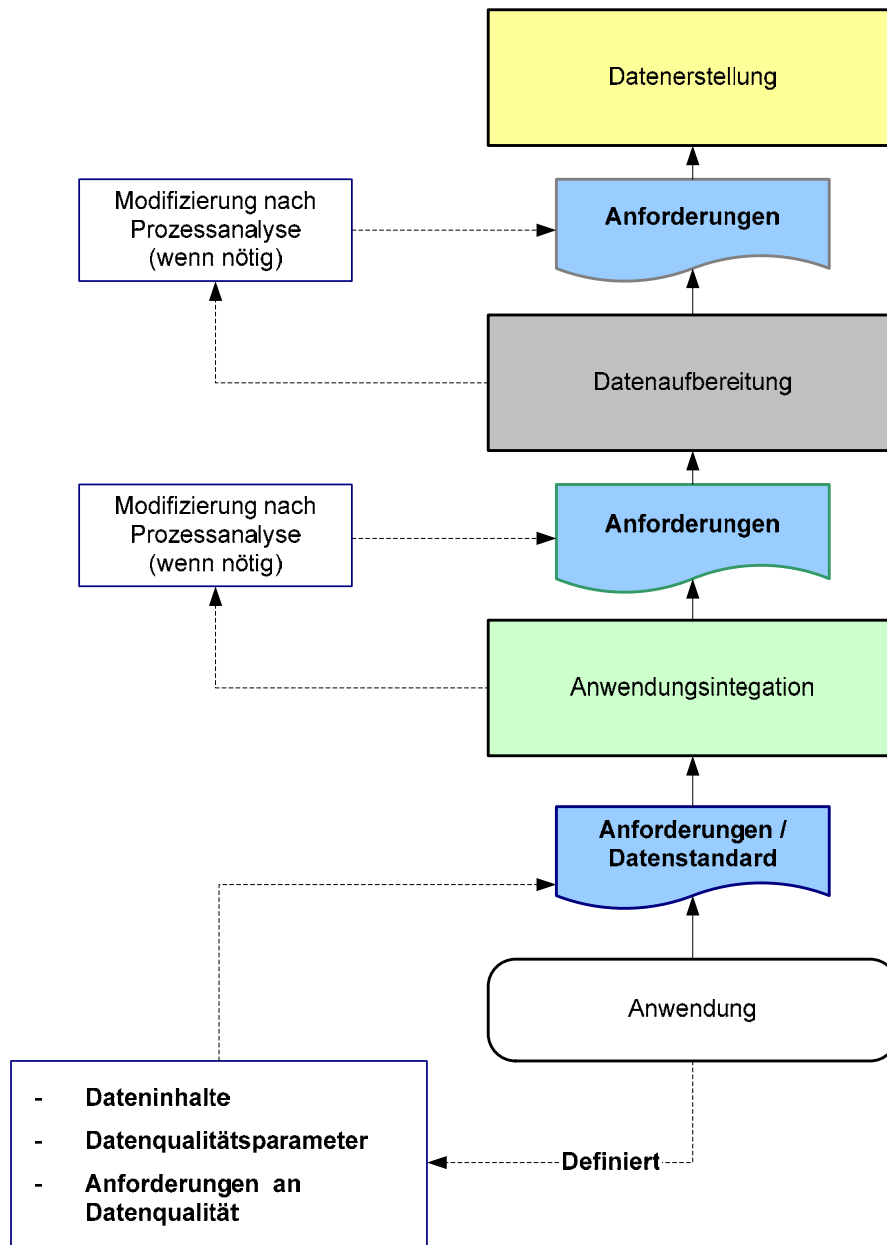
Die Verantwortung zur Definition der Rahmenparameter 1-4 liegt bei der Anwendung selbst. Sie gibt letztlich vor, welche Daten und welche Datenqualität sie zur Erfüllung der beabsichtigten Funktionalität benötigt [ISO8402]. Die Definition des Austauschformats kann individuell zwischen den einzelnen Kettengliedern erfolgen und ist nicht anwendungsspezifisch. Abbildung 22 zeigt die Verantwortung der beteiligten Kettenglieder einer Luftfahrt Datenkette zur Definition der Rahmenparameter (grüne gestrichelte Linien), daraus abgeleitete Anforderungen (hellblaue Felder) und die Verantwortung zur Umsetzung der Anforderungen (blaue solide Linien) auf.



Quelle: Eigene Grafik

Abbildung 21: Verantwortungen zur Definition der Variablen einer Luftfahrt Datenkette

Zur Implementation der anwendungsseitig definierten Rahmenparameter 1-4 werden diese entlang der Luftfahrt Datenkette rückwärtig „durchgereicht“ (Anwendung - Anwendungsintegration - Datenaufbereitung - Datenerstellung). Das „Durchreichen“ der Anforderungen ermöglicht, dass verschärfte Anforderungen eines Kettenglieds (z.B. wegen Datenqualitätsverlust durch interne Prozesse) im Rahmen von erhöhten Anforderungen für das nächste Kettenglied berücksichtigt werden können:



Quelle: Eigene Grafik

Abbildung 22: Definition von Datenanforderungen bzw. eines Datenstandards und dessen Umsetzung in der Luftfahrt Datenkette

## 4.1 Definition der Anwendung und der benötigten Dateninhalte

Die Definition der Anwendung bildet die Grundlage zur Bestimmung der Ausprägung aller anderen Rahmenparameter, da Dateninhalte, Anforderungen der Datenqualität und auch das Austauschformat sich von Anwendung zu Anwendung stark unterscheiden können.

Da Anwendungen nicht einer Luftfahrt Datenkette angepasst werden, sondern die Datenkette der Anwendung, steht deren Definition am Anfang der Entwicklung einer Luftfahrt Datenkette. Die Anwendung wird mit ihrem Funktionalitätsumfang vom Avionic-Hersteller vorgegeben, basierend auf Anforderungen vom Nutzer, wie z.B. Airlines..

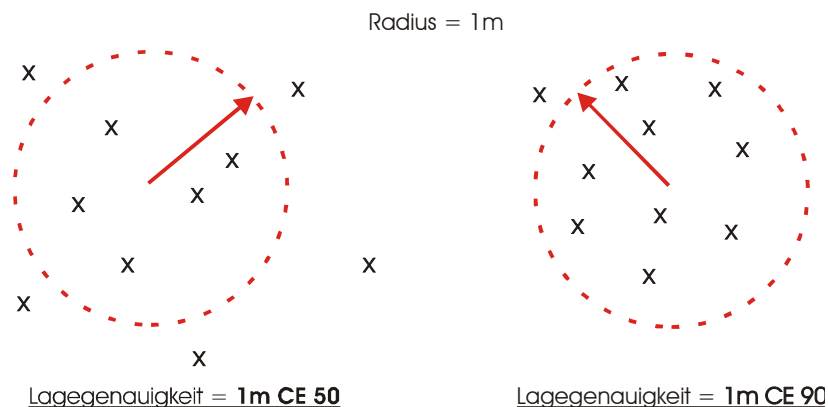
Zur Definition der benötigten Dateninhalte muss der Funktionalitätsumfang der Anwendung analysiert werden, um festzustellen, welche Inhalte zur Erfüllung der beabsichtigten

Funktionalität benötigt werden [ISO8402]. Die benötigten Dateninhalte werden in der Regel schon während der Entwicklungsphase vom Avionic-Hersteller festgelegt.

## 4.2 Analyse zur Definition der Parameter zum Beschreiben der Datenqualität

Um Datenqualitätsanforderungen definieren und darauf basierend Qualitätssicherungsprozesse für eine Luftfahrt Datenkette erstellen zu können, ist für alle Teilnehmer ein einheitliches Verständnis aller die Datenqualität beschreibenden Parameter unerlässlich. Missverständnisse bezüglich der anzuwendenden Datenqualitätsparameter und deren Definition können dazu führen, dass Daten nicht die von der Anwendung geforderte Funktion erfüllen können.

**Beispiel:** Räumliche Positionsgenauigkeit wird mit einem Vertrauensintervall angegeben, der die Wahrscheinlichkeit angibt, mit der sich eine gemessene Position in einem Umkreis mit dem Radius der Genauigkeit von der wahren Position befindet (Circular Error Probability – CEP). Wird bei der Spezifizierung der Datenanforderung der benötigte Vertrauensintervall nicht erwähnt, können Daten mit völlig verschiedener räumlicher Verteilung dennoch die Positionsgenauigkeitsanforderung erfüllen. Abbildung 23 zeigt die Auswirkung einer Genauigkeitsdefinition mit unterschiedlichem Vertrauensintervall. Links liegen 50% der Punkte innerhalb eines Kreises mit dem Radius von 1m, rechts liegen 90% der Punkte innerhalb dieses Kreises. Beide Verteilungen erfüllen eine Positionsgenauigkeit von 1m, links jedoch mit einem Vertrauensintervall von 50%. rechts mit 90%. Entscheidend für die Positionsgenauigkeit ist also nicht nur der Radius des Umkreises, innerhalb dessen Punkte zu liegen kommen sollen, sondern auch die Wahrscheinlichkeit, mit der sie innerhalb des Kreises mit dem Radius von 1m zu liegen.



Quelle: Eigene Grafik

Abbildung 23: Auswirkungen verschiedener Vertrauensintervalle bei der Angabe von Positionsgenauigkeiten

Wenn nicht anders angegeben, wird dabei von einer Normalverteilung ausgegangen. Mit zunehmenden Entfernung vom Mittelpunkt (dem Scheitelpunkt der Normalverteilung) sinkt daher die Wahrscheinlichkeit, dass sich ein Punkt dort befindet. Die CEP beinhaltet jedoch keine Begrenzung des maximalen Fehlers, d.h. mit sehr geringer Wahrscheinlichkeit kann ein Punkt sich sehr weit außerhalb des durch den CEP angegebenen Radius befinden. Wird das Fehlerintervall bei der Spezifizierung einer Positionsgenauigkeit für ein Datenelement nicht angegeben, kann dies dazu führen, dass Daten innerhalb einer Luftfahrt Datenkette prozessiert und von der Anwendung genutzt werden, die nicht die von der Anwendung geforderte Datenqualität erfüllen.

Um einheitliche Definitionen innerhalb einer Luftfahrt Datenkette sicherzustellen, muss zunächst analysiert werden, welche Datenqualitätsparameter zum Beschreiben der erforderlichen Datenqualität genutzt werden sollen. Danach sollen einheitliche Definitionen für die gewählten Datenqualitätsparameter erarbeitet werden.

Die Nutzung der erarbeiteten Definitionen im Rahmen einer Luftfahrt Datenkette ermöglicht einheitliches Verständnis aller Prozessteilnehmer bezüglich der Datenqualitätsparameter und sichert die Berücksichtigung aller relevanten Rahmenbedingungen bei der Bestimmung von spezifischen Anforderungen für eine Anwendung ab.

### 4.2.1 Vorgehensweise

Mittels Analyse relevanter Luftfahrtstandards und -vorschriften wurde untersucht, über welche Datenqualitätsparameter Datenqualität definiert ist. Im zweiten Schritt wurden die Definitionen der Datenqualitätsparameter innerhalb der analysierten Dokumente miteinander verglichen. Sollten hierbei Definitionen voneinander abweichen oder traten Widersprüche zwischen Definitionen auf, so wurde unter Angabe der Ratio eine modifizierte Definition des Datenqualitätsparameters hergeleitet. Hierbei wurden Definitionen des internationalen regulativen Organs für Luftfahrt ICAO stärker gewichtet, da Konformität mit ICAO-Vorschriften Ziel jeder Luftfahrt Daten-Qualitätssicherung ist. Bei Modifizierungen bestehender Definitionen wurde darauf geachtet, dass selbstständig beschreibende Untereinheiten nur dann entfernt wurden, wenn die resultierende modifizierte Definition den ursprünglichen sicherheitstechnischen Intentionen entspricht. [DFSQS1].

Da Englisch die vorherrschende Sprache in Luftfahrtkreisen ist und zur Vermeidung von sprachabhängigen Fehlinterpretationen wurden alle übernommenen bzw. modifizierten Definitionen auf Englisch formuliert.

Im Rahmen der Analyse wurden folgende Dokumente untersucht:

- ICAO Annex 4 *Aeronautical Charts* [ICAO4]
- ICAO Annex 11 *Air Traffic Services* [ICAO11]
- ICAO Annex 14 *Aerodromes* [ICAO14\_I]
- ICAO Annex 15 *Aeronautical Information Services* [ICAO15]
- ICAO Doc. 9674-AN/946 *World Geodetic System – 1984 (WGS84) Manual* [ICAO9674]
- ICAO Doc. 9137 *Airport Services Manual Part 6 Control of Obstacles* [ICAO9137]
- Eurocontrol *WGS84 Implementation Manual* [EURWGS]
- Eurocontrol Standard Document 007 – 97 *Surveying of Navigation Facilities* [EUR007]
- RTCA Do-200a *Standard for Processing Aeronautical Data* [Do200a]
- RTCA Do-201a *Industry Requirements for Aeronautical Information* [Do201a]
- ISO Standard 8402 *Quality Management and Quality Assurance Vocabulary* [ISO8402]

In den aufgeführten Dokumenten wurden insgesamt 42 Definitionen bezüglich Datenqualität und Parameter der Datenqualität gefunden und miteinander verglichen.



Die gefundenen Definitionen wurden in *explizite* und *implizite* Definitionen unterschieden. Explizite Definitionen werden in den untersuchten Dokumenten meistens in einem gesonderten Kapitel *Definitions* oder *Glossary* aufgeführt und/oder besitzen das Vorwort *Definition*. Implizite Definitionen sind in den Textfluss eingebettete Aussagen, bei denen ein Zusammenhang über ein Schlagwort oder über den Kontext vorliegen kann. Explizite Definitionen wurden stärker gewichtet als implizite. Lagen Widersprüche zwischen zwei expliziten Definitionen vor, so wurden zur Klärung implizite Definitionen herangezogen.

Alle untersuchten Definitionen sind in Appendix A aufgelistet.

#### 4.2.2 Parameter zum Definieren von Datenqualität

In den untersuchten Dokumenten wurden insgesamt acht Definitionen von Datenqualität gefunden. Sie sind in Appendix A aufgeführt. Zwischen den Definitionen traten Widersprüche auf: Es ist unklar, ob eine Angabe der Datenqualität durch eine allgemeine Aussage, als spezifische numerische Aussage, z.B. als prozentuale Aussage („*degree or level of confidence*“), z.B. Datenqualität = 95%) erfolgen soll, oder ob die Beschreibung von Datenqualität direkt *quantitativ* über verschiedene Datenqualitätsparameter (z.B. Genauigkeit, Integrität, Auflösung) erfolgen soll. Da im Rahmen der Definitionen und der untersuchten Dokumente nicht eindeutig beschrieben wird, wie und auf welcher Basis eine numerische Angabe des *quality levels* berechnet werden soll, kann Datenqualität auf dieser Basis nicht eindeutig definiert werden.

Bezüglich der Definition von Datenqualität quantitativ über verschiedene Datenqualitätsparameter traten innerhalb der untersuchten ICAO-Dokumente Inkonsistenzen auf, ob Datenqualität über Genauigkeit, Auflösung und Integrität oder über weitere Parameter bestimmt werden soll. Die untersuchten RTCA- und EUROCONTROL – Dokumente benutzen von ICAO verschiedene bzw. zusätzliche Elemente zum Festlegen der Datenqualität.

Insgesamt acht verschiedene Parameter wurden in den untersuchten Definitionen zum Beschreiben von Datenqualität aufgefunden:

- Positionsgenauigkeit (*Accuracy*)
- Auflösung (*Resolution*)
- Integrität (*Integrity*)
- Verfolgbarkeit (*Traceability*)
- Aktualität (*Timeliness*)
- Vollständigkeit (*Completeness*)
- Format (*Format*)
- Datenschutz (*Protection*)

Jedes der aufgeführten Parameter besitzt Gültigkeit zum Beschreiben der Fähigkeit von Daten, bestimmte Anforderungen erfüllen zu können und kann daher bei der Definition von Datenqualität nicht vernachlässigt werden. Da die Funktion des Datenqualitätsparameters Datenschutz (*Protection*) jedoch als Teilbereich des Datenqualitätsparameters Integrität (*Integrity*) angesehen werden kann (siehe Definition Integrität), soll es im Folgendem diesem zugeordnet und nicht mehr gesondert aufgeführt werden.

Die umfassendste Definition von Datenqualität bietet die RTCA Definition 29 ([Do200a], siehe Appendix A). Um den Bezug zur Anforderungsdefinition durch die Anwendung hervorzuheben, wurde sie in Anlehnung an ISO 8402 um den Term „*stated set of requirements*“ erweitert.

Hierauf basierend wird folgende Definition für Datenqualität zur Nutzung innerhalb einer Luftfahrt-Datenkette empfohlen:

*The **quality of data** is its ability to satisfy a stated set of requirements for its safe application in the end system. The quality of aeronautical data is characterized by:*

- Accuracy
- Resolution
- Integrity
- Traceability
- Timeliness
- Completeness; and
- Format.

Definition A: Definition Datenqualität (*Data Quality*)

### 4.2.3 Definition Positionsgenauigkeit (*Accuracy*)

In den untersuchten Dokumenten wurden insgesamt sechs Definitionen von Positionsgenauigkeit gefunden. Sie sind in Appendix A aufgeführt. Die Definition von Positionsgenauigkeit (*Accuracy*) war innerhalb der untersuchten Dokumente weitgehend identisch; alle Definitionen entsprechen weitgehend dem Wortlaut der Definition der ICAO-Annexe [ICAO1] [ICAO14\_I] [ICAO15] [ICAO9674]. Es wird jedoch empfohlen, eine Definition nach EUROCONTROL (Definition 3) ([EURWGS], siehe Appendix A) zu nutzen, die im Unterschied zu den oben genannten ICAO-Definitionen sowohl relative Positionsgenauigkeit als auch absolute Positionsgenauigkeit berücksichtigt und damit auch der Charakteristik räumlicher Daten entspricht, welche sich sowohl auf ein relatives System (wie z.B. dem Airport Reference Point) als auch auf ein globales Koordinatensystem beziehen können:

*“The degree of conformity with a standard, or a value accepted as correct or true. For measured positional data the accuracy is normally expressed in terms of a distance from a stated position within which there is a defined confidence of the true position falling.”*

Definition B: Definition Genauigkeit (*Accuracy*) [EURWGS]

Positionsgenauigkeit wird im Allgemeinen für die vertikale und horizontale Komponente von räumlichen Daten getrennt angegeben (Vertikale und horizontale Positionsgenauigkeit).

Nach ICAO wird die Positionsgenauigkeit für die horizontale Komponente als *Circular Error Probability (CEP)* mit einem Vertrauensintervall von 95% angegeben und gibt die Wahrscheinlichkeit an, mit der sich eine gemessene Position in einem Umkreis mit dem Radius des CEP von der wahren Position befindet [ICAO9674].

Die Positionsgenauigkeit für die vertikale Komponente wird als *Linear Error Probability (LEP)* und ebenfalls zusammen mit einem Vertrauensintervall angegeben. Das Vertrauensintervall gibt die Wahrscheinlichkeit an, mit der sich eine gemessene Position in einer Distanz des LEP von der wahren Position befindet.

*Beispiel:* (LEP(90) = 1m bedeutet, dass sich das Objekt mit 90% Wahrscheinlichkeit in einem Bereich von 1m über bis 1m unter der angegebenen Position befindet).

Um Übereinstimmung mit regulativen Vorgaben der Behörden zu gewährleisten, wird empfohlen, im Rahmen einer Luftfahrt Datenkette Positionsgenauigkeiten für die horizontale Lagekomponente als CEP und für die vertikale Lagekomponente als LEP mit einem Vertrauensintervall gemäß ICAO [ICAO15] von 95% anzugeben.

#### 4.2.4 Definition Integrität (Integrity)

In den untersuchten Dokumenten wurden insgesamt elf Definitionen von Integrität gefunden. Sie sind in Appendix A aufgeführt. Bei der Untersuchung der verschiedenen Definitionen von Integrität (*Integrity*) traten mehrere Unklarheiten auf. Zum einen wird in den untersuchten Dokumenten nicht eindeutig angegeben, auf welche Elemente sich die Integritätssicherung beziehen soll (Elemente, die sich in einem digitalen Speichersystem befinden, in gedruckter Form vorliegende Daten, etc.). Zum anderen wird uneinheitlich angegeben, welche Operationen mit Datenelementen erlaubt sind und welche Operationen die Integrität beeinflussen (wie z.B. Veränderung, Verfälschung, Verlust von Daten, etc.).

Unklarheiten traten auch bezüglich des Umfangs der Prozesskette auf, auf welche sich die Integritätswahrung erstrecken soll. Gebräuchliche Definitionen von Integrität beschreiben diese als Fehlerwahrscheinlichkeit mit zeitlichem Bezug (Fehlerwahrscheinlichkeit pro Zeitintervall). In Bezug auf Navigationsdaten wurde versucht, die Integrität von dem Bezug auf Zeitintervalle zu lösen und auf eine Prozesskette zu beziehen [DFSQ1]. Jeder Einzelprozess innerhalb dieser Prozesskette besitzt dann eine eigene (Teil-)Integrität. Die resultierende Gesamtintegrität der Prozesskette ist die Summe der Einzelintegritäten.

Um aus der (Gesamt-)Integrität einer Prozesskette den Einzelprozessen Integritätsanforderungen zuweisen zu können, muss der Start- und Endpunkt einer Prozesskette definiert sein, um darauf basierend die Anzahl der Einzelprozesse innerhalb der Prozesskette ableiten zu können.

*Beispiel:* Für eine Navigationsanwendung wird für Navigationsdaten die Zielintegrität von  $10^{-3}$  gefordert.

*Prozesskette A stellt die Navigationsdaten mittels 10 hintereinander geschalteten Einzelprozessen zur Verfügung. Rechnerisch kann jeder Einzelprozess lediglich eine minimale Integrität von  $10^{-4}$  oder besser besitzen, um die Zielintegrität der Prozesskette von  $10^{-3}$  zu wahren. Besitzt ein Einzelprozess eine höhere Integrität, so kann das eingesparte Potential zum Kompensieren der geringeren Integrität eines anderen Prozesses genutzt werden.*

*Prozesskette B stellt die Navigationsdaten mittels 100 hintereinander geschalteten Einzelprozessen zur Verfügung. Rechnerisch kann jeder Einzelprozess lediglich eine minimale Integrität von  $10^{-5}$  oder besser besitzen, um die Zielintegrität der Prozesskette von  $10^{-3}$  wahren zu können.*

Die Notwendigkeit, Integrität auf eine festgelegte Prozesskette zu beziehen, muss im Rahmen einer Definition von Integrität aufgeführt werden. Daher können die ICAO-Definitionen 7 und 10 ([ICAO11] [ICAO14\_] [ICAO15] [ICAO9674], siehe Appendix A) und die RTCA-Definitionen 13, 14 und 15 ([Do200a] [Do201a], siehe Appendix A) nicht angewandt werden.

Auch in Bezug auf Operationen, welche mit Datenelementen erlaubt sind und welche Operationen die Integrität beeinflussen, kam es zu Unklarheiten. Einige Definitionen erachten z.B. jegliche Veränderung eines Datenelementes als Beeinflussung der Datenintegrität. Bewusste und gesteuerte Änderung, wie z.B. Koordinatentransformation von einem lokalen in ein globales Bezugssystem kann jedoch nahezu ohne Genauigkeitsverlust

und damit auch ohne Integritätsverlust erfolgen. Daher wird empfohlen, Integrität lediglich auf Datenkorruption oder Datenverlust zu beziehen.

Da keine der untersuchten Definitionen ohne Unklarheiten blieb, wurde eine Definition von Integrität für Daten hergeleitet, die den Ansprüchen an technische Sicherheit, Realisierbarkeit und Ratio genügt. Sie beinhaltet die Kernelemente der untersuchten Definitionen unter Korrektur der Widersprüche und Verweis auf Festlegung der Prozesskette und Operationen, welche Integrität beeinflussen:

*The **integrity of data** can be regarded as the degree of assurance that an aeronautical data element retrieved from a storage system has not been corrupted or lost while residing in a specified aeronautical data processing chain.*

Definition C: Definition Integrität (Integrity)

#### 4.2.5 Definition Auflösung (*Resolution*)

In den untersuchten Dokumenten wurden insgesamt fünf Definitionen von Auflösung gefunden. Sie sind in Appendix A aufgeführt. Innerhalb der gefundenen Definitionen traten weder Unklarheiten noch Widersprüche auf.

Das Festlegen einer Anforderung an die Auflösung der positionsbeschreibenden Elemente von Daten hat als Ziel, einer Degradierung der Positionsgenauigkeit z.B. durch einfache und doppelte Rundungsfehler vorzubeugen. Es ist daher notwendig, die Anforderung an die Auflösung nicht nur bezüglich der Nutzung der Daten in der Anwendung zu stellen, sondern sicherzustellen, dass die Anforderung bereits bei der Datenerhebung und Datenverwaltung in digitalen Speichersystemen umgesetzt wird. Diesen Aspekt berücksichtigt Definition 19 nach EUROCONTROL ([EURWGS], siehe Appendix A) am besten. Sie berücksichtigt alle Bereiche der digitalen Datenverwaltung inklusive der Datenerhebung, Darstellung und Übertragung von Daten. ICAO Definitionen 17 und 18 ([ICAO4] [ICAO15] [ICAO9674] ), siehe Appendix A) beziehen sich dagegen ausschließlich auf das Publizieren und Erstellen von Karten im Rahmen von offiziellen Luftfahrtpublikationen und berücksichtigen nicht die Datenerhebung und die Datenverwaltung.

*“The smallest difference between two adjacent values which can be represented in a measuring system. The number of decimal points or the scale of units to which a measured or calculated data item can be recorded, displayed or transferred.”*

Definition D: Definition Auflösung (*Resolution*) [EURWGS]

#### 4.2.6 Definition Aktualität (*Timeliness*)

In den untersuchten Dokumenten wurden insgesamt drei Definitionen von Aktualität gefunden. Sie sind in Appendix A aufgeführt. Hierbei traten Widersprüche auf. Einerseits wird Aktualität definiert als “*level of confidence*”, dass Daten für die für sie vorgesehene Zeit der Nutzung gültig sind [Do200a]. Da die Aktualität von Daten insbesondere für Luftfahrtanwendungen mit kritischem Sicherheitsniveau von besonders hoher Bedeutung ist, sollte diese Merkmalsausprägung nicht als Wahrscheinlichkeit (*level of confidence*) ausgedrückt werden, sondern als binäre Merkmalsausprägung: Daten sind entweder gültig oder ungültig.

Andere Definitionen legen Aktualität als die Zeitspanne fest, für welche Daten gültig sind [Do200a][ICAO15]. Dieser Ansatz ermöglicht das aktuelle Datum bzw. das vorgesehene Nutzungsdatum mit dem Ende des Gültigkeitszeitraums der Daten durch Abfragealgorithmen im Rahmen der Anwendung zu vergleichen, um „abgelaufene“ Daten zu identifizieren.

Basierend auf diesem Ansatz wurde eine modifizierte Definition für Aktualität hergeleitet, welche die Elemente der Gültigkeit mit dem Gültigkeitszeitraum verbinden soll:

*Timeliness: The property of data to be applicable to the intended period of use*

Definition E: Definition Aktualität (*Timeliness*)

#### 4.2.7 Definition Verfolgbarkeit (*Traceability*)

In den untersuchten Dokumenten wurden insgesamt 3 Definitionen von Verfolgbarkeit gefunden. Sie sind in Appendix A aufgeführt. Hierbei wurden Widersprüche innerhalb von Definitionen und zwischen verschiedenen Definitionen festgestellt. Im Rahmen einer Definition aus [Do200a] wird zunächst gefordert, dass Informationen bezüglich Verfolgbarkeit vom Datenlieferanten bis hin zum nächsten Nutzer verfügbar sein müssen (*“traceable to the supplier and to the next user”*) [Do200a]. Im letzten Teil der Definition wird diese Anforderung jedoch deutlich erweitert. Hier wird die Verfolgbarkeit der Daten von der Datengenerierung (was jedoch in diesem Fall sehr spezifisch auf die Publikation von Daten in nationalen AIPs abzielt, und nicht auf die eigentliche Datenerhebung) bis hin zur Endanwendung gefordert. Derselbe Widerspruch tritt bei Definitionen aus [Do200a] und [ICAO15] auf.

Unklarheiten treten auch bezüglich der Art der Information auf, die zum Gewährleisten der Verfolgbarkeit aufgezeichnet werden sollen. Zum einen wird gefordert, die Datenquelle bzw. den Ursprung der Daten aufzuzeichnen, zum anderen sollen Aufzeichnungen über alle Änderungen, die an den Daten vorgenommen wurden (wie z.B. Datumstransformationen, Rundungen, Formatierungen), mit den Daten mitgeliefert werden.

Zur Definition von Verfolgbarkeit wird eine Kombination aller untersuchten Definitionen unter Berücksichtigung der kritischsten Anforderungen hergeleitet:

*Traceability: The ability of a data product to provide a record of its lineage and of the changes made to that data product since data origination. Thereby, an audit trail may be followed from the end-user to the data originator to detect the root causes of errors.*

Definition F: Definition Verfolgbarkeit (*Traceability*)

#### 4.2.8 Definition Vollständigkeit (*Completeness*)

In den untersuchten Dokumenten wurden insgesamt vier Definitionen von Vollständigkeit gefunden. Sie sind in Appendix A aufgeführt. Zwischen den Definitionen traten mehrere Unklarheiten auf. Einerseits wird die Vollständigkeit (von Daten) als Erfordernis zur Erfüllung der an die Daten gestellten Anforderung innerhalb einer Anwendung betrachtet, d.h. die Ausprägung des Datenqualitätsparameters wird als binär angesehen (die Vollständigkeit ist gemäß der Anforderung erfüllt oder nicht erfüllt). In anderen Definitionen desselben Dokuments wird sie als eine Wahrscheinlichkeit betrachtet, mit der Daten die gestellten Anforderungen an Vollständigkeit erfüllen können.

Da die Vollständigkeit von Daten insbesondere für Luftfahrtanwendungen mit kritischem Sicherheitsniveau von hoher Bedeutung ist, sollte diese Merkmalsausprägung nicht als Wahrscheinlichkeit ausgedrückt werden, sondern als binäre Merkmalsausprägung. Entsprechend wurde folgende Definition von Vollständigkeit hergeleitet:

*Completeness: The ability of a dataset to support the intended use in terms of information content.*

Definition G: Definition Vollständigkeit (*Completeness*)

#### 4.2.9 Definition Format

In den untersuchten Dokumenten wurden zwei Definitionen von Format gefunden. Zwischen beiden Definitionen trat kein Widerspruch auf; sie verhalten sich komplementär zueinander. Da jedoch keiner der beiden Definitionen alle Datenübertragungs-Schnittstellen innerhalb einer Luftfahrt-Datenkette berücksichtigt, wurden im Rahmen einer Herleitung zur Definition des Datenqualitätsparameters Format beide Definitionen kombiniert und zusätzlich die Datenübertragung innerhalb der Datenkette adressiert:

*Format: The process of translating, arranging, packing and compressing a selected set of data for distribution to a specific target system. A result of this process is a data structure that is a characteristic of data quality. The definition of the format of delivered data must be adequate to ensure that the data, when transmitted to the next intended user, is interpreted in a manner that is consistent with the intent of the data. The format of the data will also define the transmission resolution of the data.*

Definition H: Definition Format

### 4.3 Definition der benötigten Datenqualität

In Kapitel 4.2.2 wurden sieben Datenqualitätsparameter zur Definition von Datenqualität identifiziert:

- Genauigkeit
- Auflösung
- Integrität
- Verfolgbarkeit
- Aktualität
- Vollständigkeit
- Format

Mittels dieser sieben Datenqualitätsparameter kann die benötigte Datenqualität einer Anwendung definiert und an die Datenersteller, Datenaufbereiter und den Datenintegrator als Anforderung zum Aufbau von Qualitätssicherungsmaßnahmen im Rahmen der LuftfahrtDatenkette weitergereicht werden.

Die individuelle Ausprägung jedes Qualitätsparameters muss über eine Analyse der zur Erfüllung der beabsichtigten Funktionalität benötigten Datenqualität festgelegt werden [ISO8402]. Die Kritikalität der Anwendung, insbesondere die Auswirkungen einer Fehlfunktion im operationellen Umfeld ist hierbei von entscheidender Bedeutung:

- Beispiel:*
- A. *Eine Anwendung zur Flugführung im Endanflug benötigt Wegpunktinformationen von deutlich höherer Positionsgenauigkeit als eine Anwendung zur Flugführung im Enroutebereich. Die Breite einer Luftfahrtstrasse von 10-15 nm lässt im Enroutebereich einen wesentlich grösseren Spielraum bezüglich der Abweichung vom Sollflugpfad zu als die Breite eines Endanflugkanals von wenigen hundert Metern.*
  - B. *Eine Anwendung zur Flugführung benötigt Daten höherer Integrität als eine Anwendung, welche nicht zur Flugführung genutzt wird. Über die FMS-Onboard-Navigationsdaten wird das Flugzeug direkt gesteuert. Datenfehler können katastrophale Auswirkungen haben (siehe Mount Erebus Unfall Air New Zealand, Kapitel 1.1). Dagegen werden digitale Luftfahrtkarten in der Enroutephase nur zum Crosscheck des FMS genutzt [eigene Information Lufthansa]. Die Kritikalität der Luftfahrtkartenanwendung ist geringer als die eines FMS.*

Die Merkmalsausprägung der Datenqualitätsparameter ist laut den erarbeiteten Definitionen aus Kapitel 1.1 für die folgenden drei von sieben Parameter von quantitativer Natur:

- Genauigkeit
- Auflösung
- Integrität

Die Bestimmung der numerischen Ausprägung dieser Datenqualitätsparameter muss für jede über den Dateninhalt zu definierende Datenklasse einzeln in Bezug auf ihre zu erfüllende Funktionalität innerhalb der Zielanwendung erfolgen.

Drei der erarbeiteten Datenqualitätsparameter besitzen qualitative singuläre Ausprägung (d.h. sie besitzen Vorschriftencharakter):

- Verfolgbarkeit

- Aktualität
- Vollständigkeit

Prozesse müssen im Rahmen einer Luftfahrt Datenkette so ausgelegt werden, dass sie die Verfolgbarkeit, Aktualität und Vollständigkeit entsprechend deren Definitionen gewährleisten.

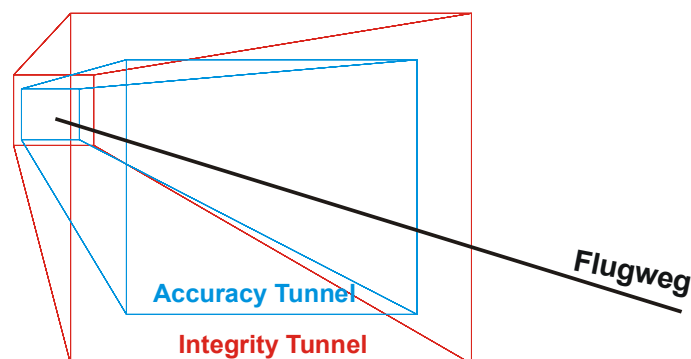
Die Merkmalsausprägung des Datenqualitätsparameters *Format* ist laut der erarbeiteten Definitionen von beschreibender Natur.

#### 4.3.1 Vorgehensweise zur Herleitung von Integritäts-, Positionsgenauigkeits-, und Auflösungsanforderungen für sicherheitskritische Luftfahrt Daten

Die zum Erfüllen der Funktionalität einer Anwendung benötigte Integrität von Daten kann über Risikoanalysen bestimmt werden [NASA1999]. Hierbei wird mittels eines statistischen Ansatzes ausgehend von einem *Target Level of Safety* (TLS), d.h. eines zu erreichenden Sicherheitslevels einer Anwendung Integritätsanforderungen an die Systemkomponenten im operationellen Betrieb abgeleitet.

Der am häufigsten genutzte Ansatz zur Risikoanalyse von Luftfahrtanwendungen ist das Konzept der RNP-Risikozuweisung (*RNP Risk Allocation*) [NASA1999]. Die RNP-Risikozuweisung basiert auf dem RNP-Konzept für Lufträume (siehe Kapitel 2.1.2). Das Risiko definiert die Wahrscheinlichkeit, dass ein Luftfahrzeug um mehr als einen definierten Betrag von seinem Sollkurs abweicht. In der RNP-Analyse wird die Navigationsleistung eines Systems über die 3 Parameter Genauigkeit, Kontinuität und Integrität definiert. Dadurch bietet sie die Möglichkeit, die Positionsgenauigkeitsanforderung in die Herleitung der Integritätsanforderung als eigenes Parameter zu berücksichtigen.

Im Rahmen des RNP-Konzeptes wird durch die Isolierung des Flugzeuges in zwei geschützte Räumen, die als Tunnel bezeichnet werden, eine Trennung zwischen Flugzeug und Hindernis erreicht. Der innere Genauigkeitstunnel setzt eine normale, fehlerfreie Funktion aller Komponenten des Navigationssystems voraus und definiert einen Bereich um die Sollposition, in welchem sich das Navigationszentrum des Flugzeugs mit 95% Wahrscheinlichkeit befinden soll. Der äußere Integritätstunnel definiert einen Bereich um die Sollposition, der von keinem Teil des Flugzeugs mit einer Wahrscheinlichkeit größer als das Ziel-Integritätsrisiko (Target Level of Safety - TLS) während einer Flugoperation unbemerkt verlassen werden darf.



Quelle: Eigene Grafik

Abbildung 24: RNP Tunnel-Konzept

Das Verletzen der Tunnelgrenzen des äußeren Integritätstunnels wird als Tunnelvorfall (Incident) bezeichnet. Nicht jeder Tunnelvorfall führt jedoch zwangsläufig auch zu einem Unfall (Accident). Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Tunnel-Vorfall zu einem Verlust des



Flugzeuges führt, geht als Accident/Incident-Ratio in die Analyse mit ein. Das Produkt aus Target Level of Safety (TLS) und Accident/Incident-Ratio gibt das Risiko für den Verlust des Flugzeugs bei unbemerktem Verletzen der Tunnelgrenzen an.

Das Risiko einer Verletzung des Integritätstunnels wird gleichmäßig auf die drei RNP-Parameter Integrität, Genauigkeit und Kontinuität aufgeteilt. Bei dieser Art der Risikoverteilung wird implizit angenommen, dass die Risiken für den Verlust der Integrität, der Genauigkeit und der Kontinuität statisch voneinander unabhängig sind [IFF1998].

Die mittels der RNP-Risikozuweisung ermittelten Anforderungen für Integrität, Genauigkeit und Kontinuität können durch verschiedene Methoden, wie z.B. operationelle Daten, Simulationen, Testflüge und Analysen validiert werden [NASA1999].

##### 4.3.1.1 Vorgehensweise zur Herleitung von Integritätsanforderungen

Zur Bestimmung der Anforderung an Integrität und Kontinuität einer Flugführungsanwendung durch eine RNP-Risikozuweisung müssen zunächst folgende Variablen definiert werden:

- *Target Level of Safety* (TLS) der Flugoperation (nach ICAO definiert mit  $10^{-7}$ / Flugstunde, [ICAO10], [CAA77002])
- Kenntnis der Luftfahrtteiloperationen, für welche die Anwendung genutzt wird
- Zeitlicher Anteil der Teiloperation an der Gesamtflugoperation
- Verhältnis Unfälle/tödliche Unfälle für Teiloperation (aus historischen Quellen)
- Verhältnis Accident/Incident für Teiloperation (aus historischen Quellen)
- Risiko von Pilotenfehler (aus publizierten Untersuchungen)

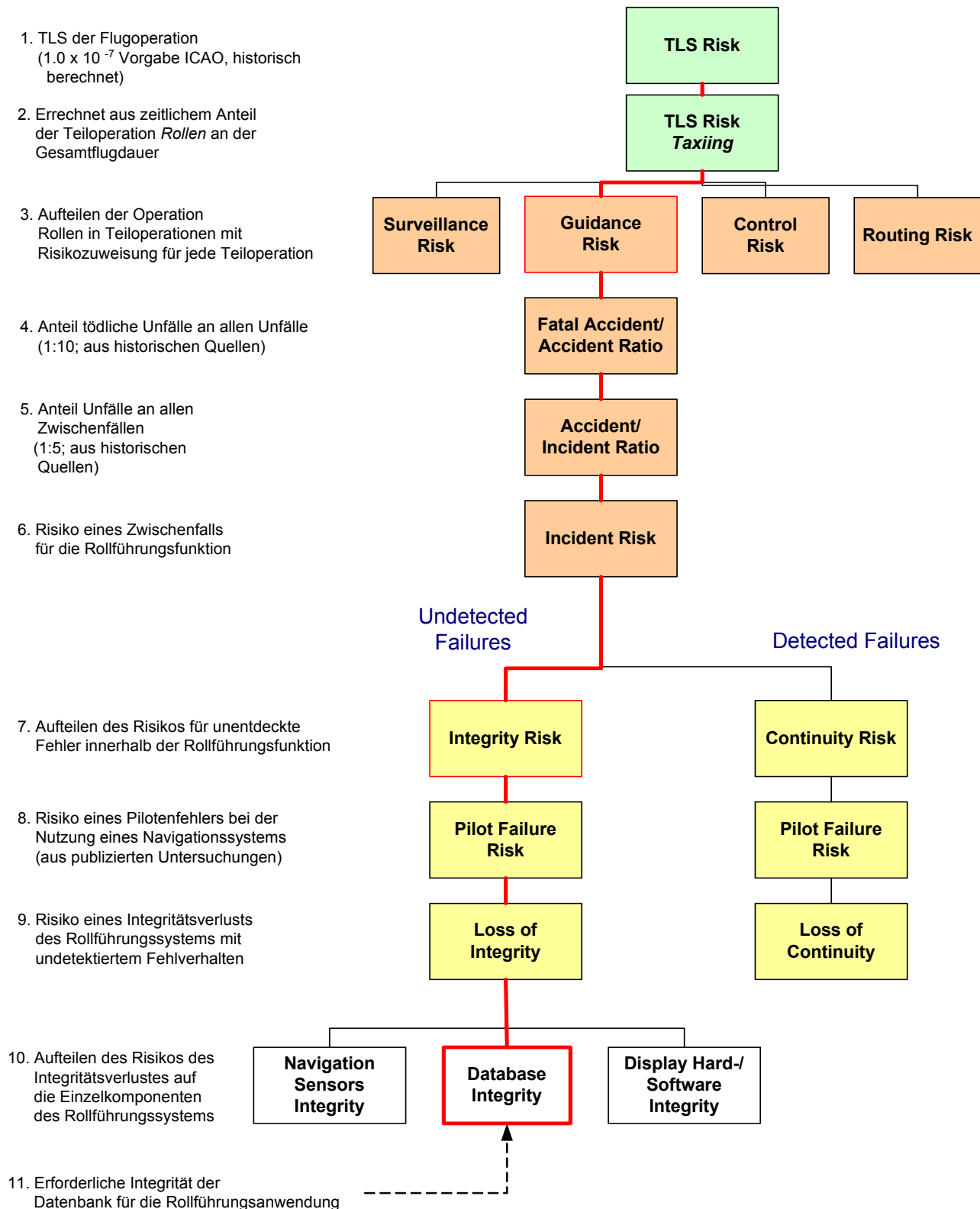
[NASA1999]

Weiterhin geht man von folgenden Annahmen aus:

- Gleichmäßige Risikoverteilung zwischen detektierten (Continuity) und nicht-detektierten (Integritäts-) Fehlern, basierend auf der Incident-Wahrscheinlichkeit
- Gleichmäßige Risikoverteilung der Wahrscheinlichkeit des Integritätsverlusts auf die Systemkomponenten Navigation Sensor, Database und Display Hard- und Software.

[NASA1999]

Am Beispiel einer von der NASA 1999 durchgeführten RNP-Risikozuweisung für ein Rollführungssystem veranschaulicht Abbildung 25 die schematische Vorgehensweise einer Risikoanalyse zum Herleiten der erforderlichen Integrität von Daten zur Nutzung in einem Rollführungssystem.



Quelle: [NASA1999, angepasst]

Abbildung 25: Risiko Analyse für eine Rollführungsanzeige nach dem RNP-Konzept

Unter der Annahme, dass jegliche Datenkorruption der Datenbank auch zu einem Integritätsverlust (*Loss of Integrity*) führt, kann die aus der Risikoanalyse basierend auf dem TLS abgeleitete Integritätsanforderung mit zeitlicher Komponente (nämlich die Dauer der

Teiloperation) auch als Datenintegritätsanforderung ohne zeitliche, jedoch mit prozessorientierter Komponente übernommen werden.

ICAO unterteilt Datenintegritätsanforderungen in drei Kritikalitätsklassen [ICAO15], die Mittels Risikoanalysen für verschiedene Flugführungsanwendungen abgeleitet wurden [DFSQS3]:

- „Critical Data ( $10^{-8}$ ): *There is a high probability when using corrupted critical data that continued safe flight and landing of an aircraft would be severely at risk with the potential for catastrophe.*”
- „Essential Data ( $10^{-5}$ ): *There is a low probability when using corrupted essential data that continued safe flight and landing of an aircraft would be severely at risk with the potential for catastrophe.*”
- „Routine Data ( $10^{-3}$ ): *There is a very low probability when using corrupted routine data that continued safe flight and landing of an aircraft would be severely at risk with the potential for catastrophe.*”

[ICAO15]

#### 4.3.1.2 Vorgehensweise zur Herleitung von Anforderungen an Positionsgenauigkeit

Die erforderliche horizontale Positionsgenauigkeit von räumlichen Daten kann nach dem Prinzip der RNP aus dem zulässigen Gesamtsystemfehler (Total System Error - TSE) der Teiloperation bestimmt werden [NASA1999]. Der TSE wird hierbei in Relation zu einem bestimmten Zeitintervall definiert (z.B. muss nach dem Prinzip der RNP der TSE während 95% der für die Teiloperation benötigten Zeit vom System unterschritten werden).

Um den TSE zu berechnen, müssen zunächst operationell abgeleitete räumliche Einschränkungen definiert werden:

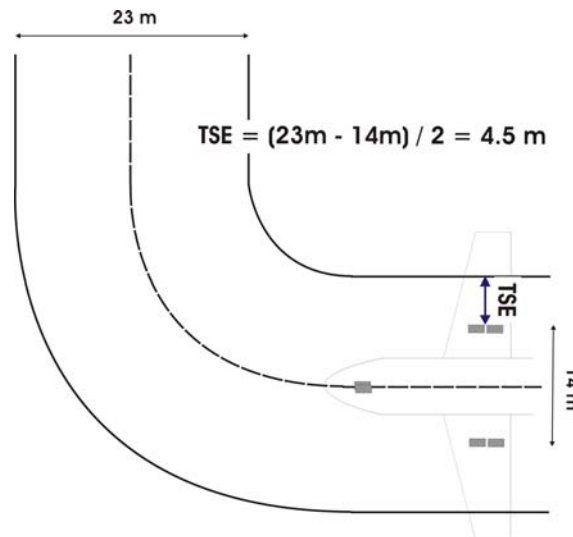
*Beispiel: Beim Rollen unter Nutzung einer Rollführungsanzeige darf das Fahrwerk nie die Oberfläche des Rollweges verlassen*

Der Abstand zwischen Rollwegkante und Fahrwerk darf einen gewissen Wert nicht unterschreiten; d.h. der Mittelpunkt des Fahrwerks darf sich nur um einen begrenzten Wert (den TSE) von der Mittellinie des Rollweges fortbewegen. Um den TSE zu berechnen, wird die Kenntnis

- der Breite des zu nutzenden Rollweges
- der Breite des Hauptfahrwerks
- der Lage des zur Darstellung des Flugzeugs in der Anwendung genutzten Navigationsschwerpunktes relativ zum Hauptfahrwerks

benötigt.

Unter Annahme, dass der Navigationsreferenzpunkt in der Längsachse des Flugzeugs in Höhe des Hauptfahrwerks liegt, entspricht der zulässige TSE für eine Rollführungsanzeige für einen Flughafen mit minimaler Rollwegbreite von 23 m und einer angenommenen Breite des Hauptfahrwerks von 14 m 4.5 m. Das bedeutet, ein Flugzeug darf maximal 4.5 m von der Mittellinie des Rollweges abweichen, bevor ein Zwischenfall (verlassen des Rollweges) eintritt [NASA1999].



Quelle: Eigene Grafik

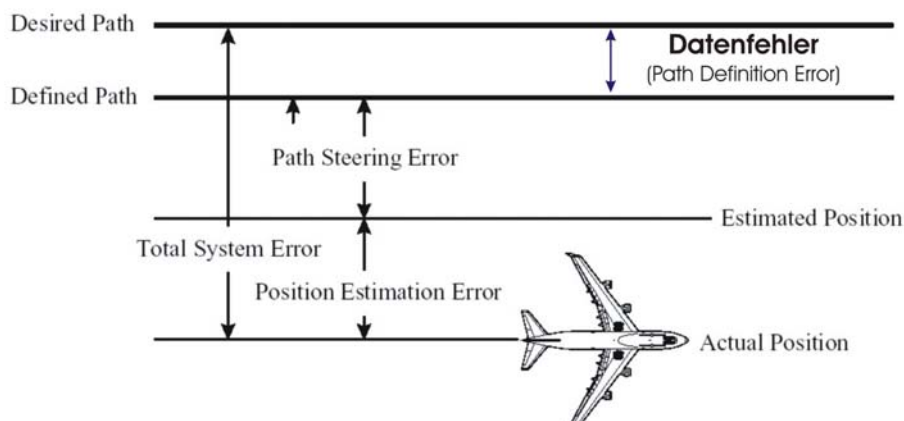
Abbildung 26: Berechnung des Total System Errors (TSE) einer Rollführungsfunktion

Um aus dem TSE Positionsgenauigkeiten abzuleiten, werden seine drei Fehlerkomponenten isoliert:

- Pilotensteuerfehler (*Pilot Steering Error*)
- Fehler des Navigationssystems (*Position Estimation Error*)
- Datenfehler (*Path Definition Error*)

[NASA1999]

Die Datenfehlerkomponente kann als die erforderliche Datengenauigkeit übernommen werden, welche zum Erfüllen der Funktionalität der Anwendung benötigt wird.



Quelle: [NASA1999, angepasst]

Abbildung 27: Datenfehler als Komponente des Total System Errors (TSE) [NASA1999]

Abbildung 27 stellt das Worst-Case Szenario dar: Alle Fehlerkomponenten besitzen gleiche Vorzeichen. Bei verschiedenen Vorzeichen der Komponenten kann es zur Reduktion des Total System Errors kommen.

#### **4.3.1.3 Vorgehensweise zur Herleitung von Auflösungsanforderungen**

Die Auflösung der positionsbeschreibenden Koordinaten und anderer numerischer Datenkomponenten muss in Bezug zu für sie spezifizierten Positionsgenauigkeit gewählt werden. Sie muss so gewählt werden, dass der resultierende Gesamtpositionsfehler während der Datenprozessierung und während der Nutzung in der Anwendung durch einfache oder doppelte Rundungsfehler nie größer als die benötigte Positionsgenauigkeit der Daten wird.



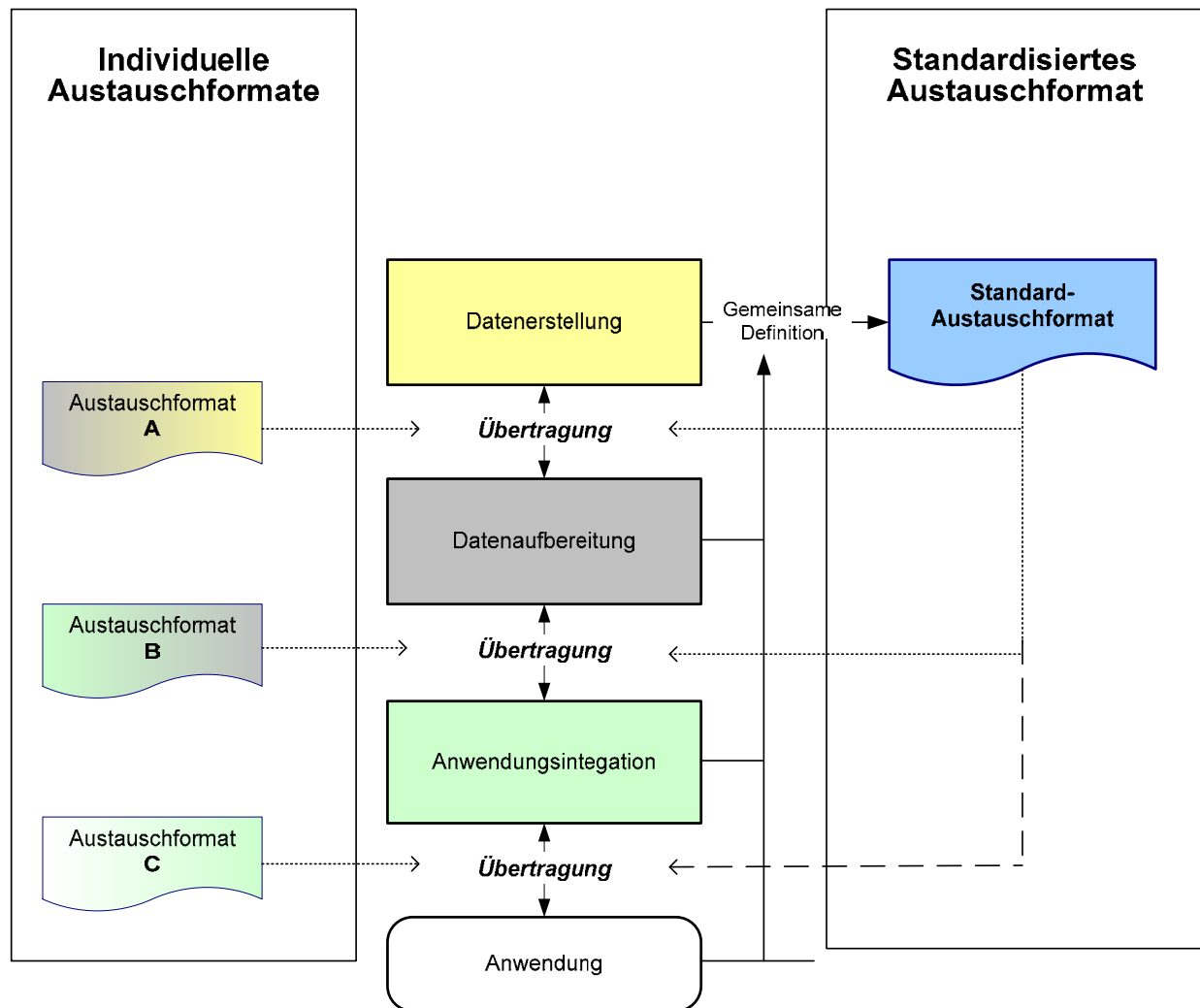
#### **4.4 Beschreibung eines standardisierten Austauschformates**

Laut Definition Format (Definition H) soll durch ein standardisiertes Austauschformat sichergestellt werden, dass Daten nach einem Datentransfer von dem Empfänger noch gemäß ihrer Bestimmung interpretiert werden können. Um dies sicherzustellen, muss das Austauschformat so gewählt werden, dass die definierte Datenqualität der sechs verbleibenden Datenqualitätsparameter während des Datentransfers nicht verschlechtert wird.

Hierzu müssen verschiedene Faktoren bei der Definition eines Austauschformats berücksichtigt werden:

- Die von der Anwendung benötigten Dateninhalte müssen mit ihren räumlichen und beschreibenden Komponenten im Austauschformat abgebildet werden können.
- Die definierten Anforderungen an die Auflösung müssen im Austauschformat berücksichtigt werden.
- Zusätzliche Metadaten zur Beschreibung von Referenzsystemen, zeitlichen Bezügen und Datenprozessierungsschritten müssen abgebildet werden können, um den Anforderungen an Verfolgbarkeit und Aktualität gerecht zu werden.

Das Austauschformat kann zwischen zwei Kettengliedern individuell definiert werden. Um die Prozesse innerhalb der Luftfahrt Datenkette zu vereinheitlichen, wird jedoch oft ein einheitliches, standardisiertes Austauschformat für die Datenübertragung aller beteiligten Kettenglieder definiert. Das von der Anwendung benötigte Dateneingangsformat kann aufgrund anwendungsspezifischer Vorgaben (wie z.B. hohe Datenverarbeitungsgeschwindigkeit, geringes Datenvolumen, etc.) jedoch andere Eigenschaften besitzen als das Austauschformat zwischen den übrigen Kettengliedern, bei denen Datenvolumen und Prozessierungsgeschwindigkeit nur untergeordnete Rolle spielen, und wird daher oft eine andere Struktur besitzen.



Quelle: Eigene Grafik

Abbildung 28: Definition von Austauschformaten

## 4.5 Verantwortung zum Gewährleisten der Datenqualität

Im Rahmen der LuftfahrtDatenkette ist die Verantwortung der Kettenglieder zur Gewährleistung der definierten Inhalts- und Datenqualitätsanforderungen unterschiedlich aufgeteilt:

### Positionsgenauigkeit

Die Anforderungen an die Positionsgenauigkeit müssen primär von dem ersten Glied der LuftfahrtDatenkette, der Datenerstellung, umgesetzt werden. Als erstes Kettenglied erzeugt sie Daten und kann hierbei über die Auswahl eines adäquaten Datenerstellungsverfahrens die anfängliche Datengenauigkeit steuern. Die bei der Datenerstellung erreichte Positionsgenauigkeit kann im Rahmen der Prozesse der Folgeglieder nur noch mit großem Aufwand verbessert werden. Dies gilt insbesondere für räumliche Daten, die als abstrakte Abbildungen realer Phänomene eine Verbesserung der Positionsgenauigkeit nicht ohne erneutes Herstellen des Bezuges zwischen räumlichen Datenelement und reellem Phänomen zulassen. Während den der Datenerstellung nachgelagerten Folgeprozessen der anderen Kettenglieder muss das Vermeiden von Degradierung der Positionsgenauigkeit gegenüber den definierten Anforderungen im Rahmen der Umsetzung der Integritätsanforderungen durch Auswahl adäquater Prozessierungsmethoden erfolgen. Dies betrifft jedes Kettenglied.



### **Auflösung und Vollständigkeit**

Auch die Umsetzung der Anforderungen an Auflösung und Vollständigkeit der Datenelemente betrifft im Schwerpunkt die Datenerstellung. Wird die Auflösung der positionsbeschreibenden Elemente von räumlichen Daten bei der Datenerstellung nicht entsprechend den Vorgaben definiert, so geht dies in der Regel mit einem Genauigkeitsverlust und Datenkorruption (Integritätsverlust) einher. Eine nachträgliche Erhöhung der Auflösung von positionsbeschreibenden Elementen ist zwar möglich, kann aber einen vorherigen Genauigkeitsverlust nicht kompensieren, da Teile der ursprünglichen Information verloren sind. Die Anforderungen an Vollständigkeit beziehen sich auf die definierten Dateninhaltsanforderungen. Vollständigkeit ist dann gewährleistet, wenn die definierten Dateninhaltsanforderungen erfüllt sind. Die Umsetzung der Anforderung betrifft primär das Datenerstellungsglied, welches durch die Auswahl adäquater Datenerstellungsmethoden die inhaltliche Vollständigkeit der Daten sicherstellen muss. Ein späteres Herstellen der erforderlichen Vollständigkeit ist z.B. im Rahmen einer LuftfahrtDatenkette des Baumtyps möglich (siehe Abbildung 19), geht jedoch mit der Verschneidung der Daten zum Erreichen eines vollständigen Datensatzes einher. Sowohl die Vollständigkeit als auch die Auflösung kann im Rahmen inadäquater Prozesse einer Luftfahrtkette degradiert werden und verursacht Datenkorruption mit Positionsgenauigkeits- und Integritätsverlust. Das Vermeiden der Degradierung von Vollständigkeit und Auflösung nach der anfänglichen Datenerstellung in Hinsicht auf die definierten Anforderungen muss im Rahmen der Umsetzung der Integritätsanforderungen durch Auswahl adäquater Prozessierungsmethoden erfolgen und betrifft jedes Kettenglied.

### **Aktualität**

Zur Umsetzung der Anforderungen an Aktualität innerhalb der LuftfahrtDatenkette müssen zum einen notwendige Datenänderungen detektiert (Change Detection) und diese Änderungen anschließend auch aufgenommen und eingearbeitet werden (*Change Acquisition*). In der Praxis wird beim Erstellen von Luftfahrtkarten das Detektieren von Änderungen in der Regel durch das Datenerstellungsglied (z.B. durch *AIP Amendments* oder *AIP Supplements* als Änderungsveröffentlichungen der nationalen Luftfahrtbehörden) oder durch Feedback des Anwendungsgliedes (z.B. Pilotenfeedback) durchgeführt. Die Aufnahme und Einarbeitung der Änderung liegt in der Verantwortung der Datenerstellung.

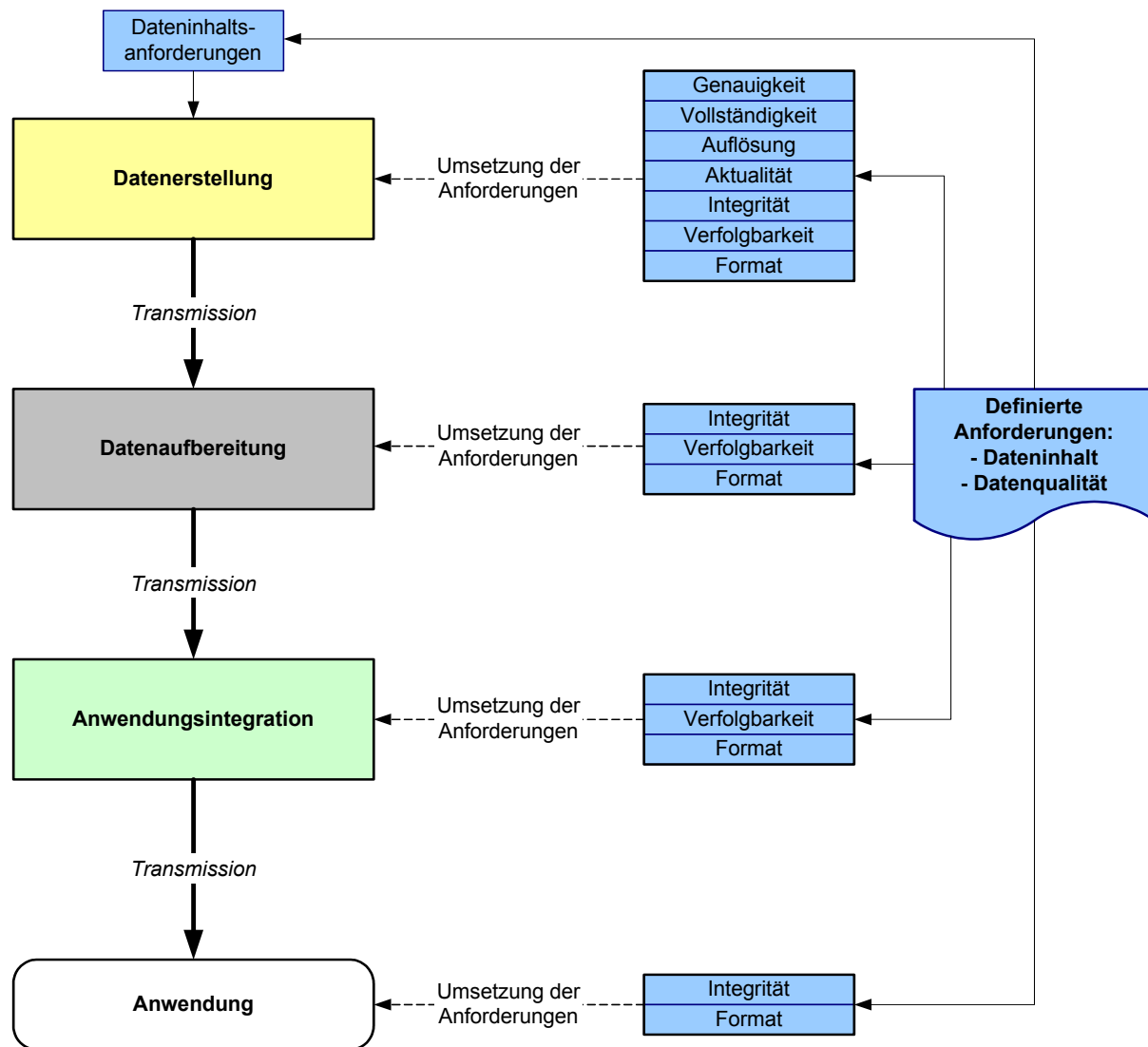
### **Verfolgbarkeit und Format**

Die Umsetzung der definierten Anforderungen bezüglich Verfolgbarkeit und des Formats betrifft nach Definition F und [Do200a] jedes Kettenglied. Verlust der Verfolgbarkeit oder Datenkorruption durch Formatfehler müssen im Rahmen der Umsetzung der Integritätsanforderungen durch Auswahl adäquater Prozessierungsmethoden vermieden werden und betreffen jedes Kettenglied.

### **Integrität**

Die Umsetzung der Integritätsanforderungen betrifft nach Definition C ebenso alle Kettenglieder. Sie steht in Bezug zu den definierten Anforderungen aller anderen Datenqualitätsparameter. Die Prozessintegrität fungiert als Kontrollorgan, um Datenkorruption in Bezug auf Abweichung von allen anderen Datenqualitätsparameter zu vermeiden. Degradierung jedes einzelnen Datenqualitätsparameters über die Grenzen der definierten Anforderungen zieht den Verlust der Integrität nach sich. Durch Auswahl adäquater Prozesse kann Datenkorruption vermieden werden.

Die Verantwortung zur Umsetzung der definierten Datenqualitäts- und Dateninhaltsanforderungen innerhalb der LuftfahrtDatenkette wird in folgendem Schaubild aufgezeigt:



Quelle: Eigene Grafik

Abbildung 29: Verantwortung zur Umsetzung von definierten Datenqualitätsanforderungen

Wie aus Abbildung 29 ersichtlich, nimmt die Datenerstellung in Bezug auf die Umsetzung der definierten Anforderungen eine Sonderrolle innerhalb der Luftfahrt Datenkette ein. Zusätzlich zur Umsetzung der Datenqualitätsparameter Format, Integrität, Aktualität und Verfolgbarkeit, welche alle Kettenglieder betrifft, ist die Datenerstellung auch für die Umsetzung der Anforderungen an Genauigkeit, Vollständigkeit, und Auflösung sowie für die Gewährleistung des benötigten Dateninhaltes verantwortlich. Die bei der Datenerstellung erreichte Genauigkeit, Vollständigkeit und Auflösung wird im Rahmen der Prozesse der Folgeglieder durch korrekte Umsetzung der Integritätsanforderungen gewahrt.

## 5 Herleitung der Notwendigkeit von Flughafendatenbanken

### 5.1 Gefahrenfaktoren von Rolloperationen

Das Rollen auf dem Flughafen vor dem Start und nach der Landung zählt zu den kritischen Manövern der Flugdurchführung. Um den Rollvorgang auf dem Boden sicher durchführen zu können, muss dem Piloten zu jedem Zeitpunkt nicht nur die eigene Position auf dem Flughafen bekannt sein, sondern auch die Position anderer Flugzeuge und Fahrzeuge relativ zur eigenen Position, um potentielle Konfliktsituationen frühzeitig erkennen bzw. von vorne herein vermeiden zu können. Im heutigen Flughafenumfeld findet diese Überwachung vom Piloten durch visuelles Scannen des Umfeldes und dem Mithören der Anweisungen des Vorfeldlotsen statt. Diese Methode reicht bei guter Sicht unter *Visible Meteorological Conditions* (VMC) zur Konflikterfassung aus. Unter Stresssituationen durch hohe Arbeitsbelastung und komplexen Flughafenlayouts kann diese Methode die Sicherheit beim Rollen nicht mehr vollständig gewähren [Do-272a]. In solchen Situationen können Unsicherheiten auftreten, die bestenfalls zu Verzögerungen und schlimmstenfalls zu *Runway Incursion* und Rollunfällen führen.

Mehrere Faktoren wurden von der FAA als potentielle Gefahrenquellen beim Rollen identifiziert:

- komplexe Startbahn- und Rollwegeanordnungen, insbesondere auf Flughäfen, welche im Rahmen von Expansionsmaßnahmen durch Anbauten und Erweiterungen ihre Kapazitäten erhöhten
- steigenden Anzahl an Flugbewegungen
- eng gestaffelte Startzeiten
- alle ungünstigen Kombinationen von schlechtem Wetter, Tageszeit, Flugzeugtyp und mangelnder Sprachkenntnis.

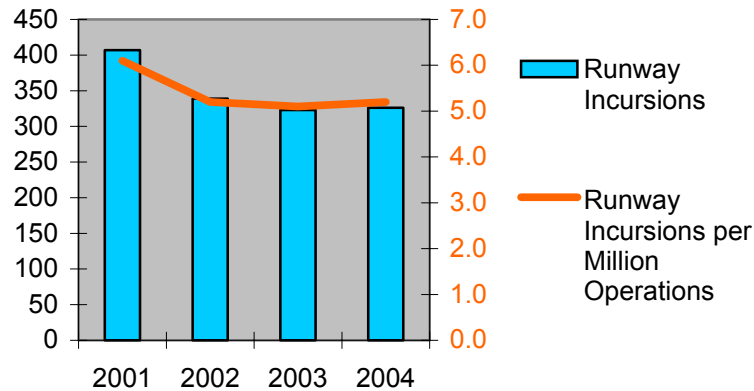
[AC120-74A]

[Rot2005] und [RTCA194] identifizieren auch missverständliche Beschilderung als eine potentielle Gefahrenquellen beim Rollen.

Der Verlust des Situationsbewusstseins beim Rollen kann im geringsten Fall zu Verspätungen durch „Verrollen“ auf dem Vorfeld, im schlimmsten Fall zu *Runway Incursion* Zwischen- oder Unfällen führen. *Runway Incursion* tritt dann auf, wenn ein Flugzeug, Fahrzeug, Person oder Objekt auf dem Boden eine Kollisionsgefahr für ein startendes oder landendes Flugzeug auf einem kontrollierten Flugplatz verursacht [NTSB2000].

Die Anzahl an *Runway Incursion* Zwischenfälle hat in den letzten 20 Jahren stark zugenommen:

*“In 1999, the number of runway incursions was 71 percent greater than the number in 1993, and the incursion rate per 100,000 flight operations in 1999 was 56 percent greater than in 1993” [NTSB2000]*



Quelle: [FAA2005]

Abbildung 30: Runway Incursions U.S.A. 2002 – 2004

Von 2001 bis 2002 ging die *Runway Incursion Rate* zwar deutlich zurück, stagniert jedoch seitdem auf relativ hohem Level. Die US-Flugsicherungsbehörde FAA registrierte 2004 auf amerikanischen Flughäfen 326 *Runway Incursion* Vorfälle, davon im Schnitt zwei pro Monat so kritisch, dass ein Unfall möglich gewesen wäre [Rot2005]. In den EU-Staaten gibt es laut EUROCONTROL annähernd 365 *Runway-Incursion* Vorfälle pro Jahr (einen pro Tag), und auch hier zwei kritische Vorfälle pro Monat [Rot2005].

Der Entwicklung von Technologien zur Vermeidung von Runway Incursion wird daher von dem amerikanischen *National Transportation Safety Board* (NTSB) höchste Wichtigkeit beigemessen [NTSB2004].

Mehrere bedeutende Unfälle der Luftfahrtgeschichte ereigneten sich als Folge von *Runway Incursion*, darunter der Zusammenstoß zweier Boeing 747 auf der Startbahn von Teneriffa-Norte im Jahr 1977 (mit 583 Toten der bislang größte Luftfahrtunfall) [ASN1977]. Mehrere schwere Unfälle ereigneten sich in der jüngeren Vergangenheit:

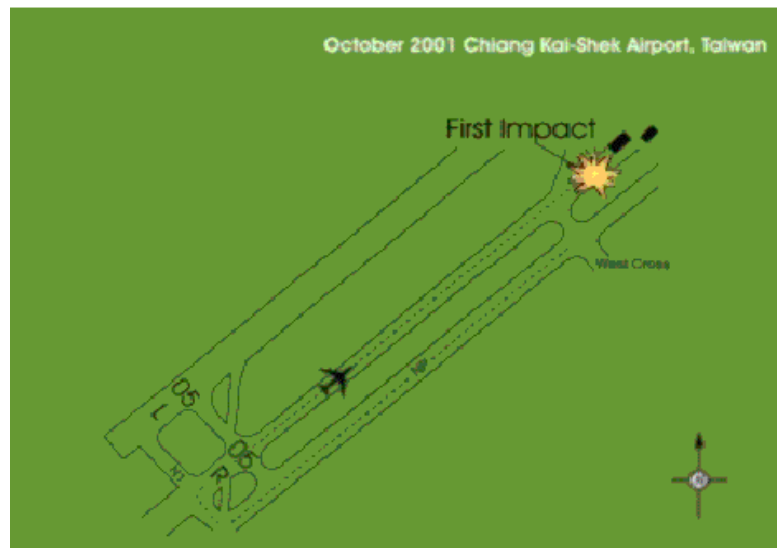
- der Zusammenstoß einer startenden Boeing 747 mit Baufahrzeugen auf der Startbahn von Tapei-Chiang Kai Shek im Jahr 2000 [ASN2000]
- der Zusammenstoß einer MD-87 mit einer Cessna Citation auf der Startbahn von Milano-Linate im Jahr 2001 [ASN2001]
- der Start eines Canadair Regionjets von der falschen Startbahn in Lexington, KY, im Jahr 2006 [ASN2006]. Per Definition ist dies zwar kein typischer Runway Incursion Unfall, wurde jedoch aus mangelndem räumlichen Situationsbewusstsein der Piloten verursacht.

Zum besseren Verständnis der Runway-Incursion-Problematik werden diese Unfälle hier kurz angerissen:

#### **Zusammenstoß einer startenden Boeing 747 mit Baufahrzeugen auf der Startbahn von Tapei-Chiang Kai Shek im Jahr 2000:**

Am 31. Oktober 2000 um 23.17 Uhr lokaler Zeit streifte eine Boeing 747-400 der Singapore Airlines (Flug SQ006) während des Startvorgangs auf der Startbahn 05R des Chiang Kai-Shek Flughafens in Taiwan Absperrungen und Baufahrzeuge einer auf der Startbahn befindlichen Baustelle. Die Startbahn war zu diesem Zeitpunkt wegen der Baumassnahmen teilweise geschlossen. Der Zusammenstoß verursachte 83 Todesopfer. Die Besatzung von Flug SQ006 war sich der teilweisen Sperrung der Startbahn 05R bewusst. Es war ihr

bekannt, dass diese Startbahn nur zum Rollen benutzt werden durfte. Entgegen der Anweisung des Lotsen passierte das Flugzeug nicht die Threshold-Marking Area der Startbahn 05R und setzte das Rollen in Richtung Startbahn 05L fort, sondern drehte auf die (nur als Rollweg freigegebene) Startbahn 05R ein und begann den Startvorgang. [FSF2002]



Quelle: [FSF2002]

Abbildung 31: Rollweg von Flug SQ006 am 31. Oktober 2000

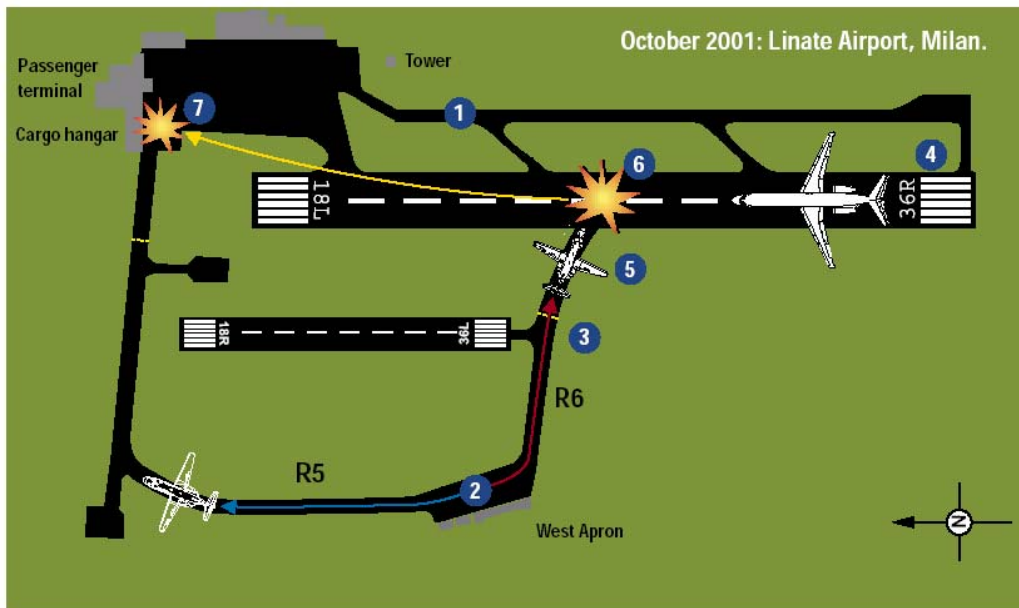
Von der Unfalluntersuchungskommission wurden mehrere Faktoren identifiziert, welche direkt und indirekt zum Unfall beitrugen:

1. Schlechte Sicht: Zum Unfallzeitpunkt herrschte heftiger Regen und starker Wind; die *Runway Visibility Range* (RVR) betrug 800m.
2. Zeitdruck: Eine Schließung des Flughafens war wegen weiterer Wetterverschlechterung vorausgesagt. Um noch rechtzeitig Starten zu können, musste die Crew von SQ006 zügig verfahren.
3. Mangelhafte Vorbereitung: Die Besatzung versäumte es, sich mit der Rollroute zur Startbahn 05R im Voraus ausreichend vertraut zu machen. Es war der Besatzung nicht klar, dass, um Startbahn 05L zu erreichen, Startbahn 05R überquert werden musste.
4. Fehlendes räumliches Situationsbewusstsein: Obwohl die Besatzung während des Rollens Flughafenkarten mit sich führte, verifizierte sie den Rollweg nicht. Das Verifizieren der aktuellen Position auf der Karte hätte genügend Hinweise gegeben, um zu verhindern, dass der Startvorgang auf der falschen (geschlossenen) Startbahn durchgeführt wurde.

[FSF2002]

### **Zusammenstoß einer MD-87 mit einer Cessna Citation auf der Startbahn von Milano-Linate im Jahr 2001**

Auch bei dem Zusammenstoß einer MD-87 der SAS und eines Citation CJ2 Business Jet in Milano Linate wurden schlechte Sichtverhältnisse und fehlendes räumliches Situationsbewusstsein als Unfallursache identifiziert. Das Fehlen eines Surface Surveillance Systems im Kontrollturm zur Überwachung der Rollführung trug ebenfalls zum Unfallhergang bei [RTCA194]:



Quelle: [RTCA194]

Abbildung 32: Sequenz der Ereignisse auf dem Flughafen Milan-Linate Airport am 8. Oktober 2001

1. SK686 rollt zum Haltepunkt für Runway 36R. Obwohl sich die Sichtbedingungen verbessern, beträgt die RVR immer noch lediglich 225 m.
2. Die auf dem West-Vorfeld geparkte D-IEVX erhält die Rollfreigabe zum Rollen via "Romeo 5" (R5) und mit Meldung beim Erreichen des ersten Haltepunkts. Der Pilot liest die Freigabe korrekt gegen, biegt jedoch irrtümlich auf den Rollweg R6 ein.
3. Der Pilot von D-IEVX erfragt eine Freigabe zum Weiterrollen an dem R5 Haltepunkt, obwohl er sich irrtümlich am Haltepunkt für Runway 18L/36R befindet.
4. SK686 erhält die Startfreigabe.
5. D-IEVX überquert den Haltepunkt für Runway 18L/36R.
6. Die beiden Flugzeuge stoßen zusammen.
7. Die gerammt MD-87 schlittert von der Runway in einen Gepäckhangar direkt neben dem Passagierterminal.

Im Rahmen des Berichts zur Unfalluntersuchung wurden folgende Faktoren aufgeführt, welche zum Unfall beitrugen:

1. Menschlicher Fehler der Cessna Citation Piloten als Hauptursache
2. Inadequate Sicherheitsvorkehrungen der Flugsicherung
3. Inadequate Rollwegbeschilderung und -Ausrüstung

Während der Unfalluntersuchungen konnte nicht geklärt werden, wieso die Crew der D-IEVX fälschlicherweise auf Rollweg R6 einbog, obwohl sie korrekterweise die Rollfreigabe über Rollweg R5 gegenlasen und bestätigten. Desorientierung durch geringe Sicht sowie inadäquate Rollwegbeschilderungen konnten als Ursache nicht ausgeschlossen werden. Es ist jedoch eher denkbar, dass die Besatzung eine Rollfreigabe via Rollweg R6 erwartete, denselben Rollweg, den sie schon bei der Landung eine Stunde zuvor benutzten, und voraussetzten, dass dies der freigegebene Rollweg sei. Auf ähnliche Weise setzte auch der Vorfeldlotse voraus, dass die Citation den freigegeben Rollweg folgte, obwohl die Reporte über Funk dies nicht bestätigten konnten. [RTCA194]

### Start eines Canadair Regionaljets von der falschen Startbahn in Lexington, KY, im Jahr 2006

Zum Unglückszeitpunkt um 5.54 Uhr lokaler Zeit war das Wetter in Lexington allgemein gut. Es war noch dunkel, als der Comair Flug 5191 zum Starten rollte. Der Flug hatte eine Startfreigabe auf Runway 22, dem längeren der beiden Startbahnen in Lexington.

Da Runway 22 erst kurz zuvor verlängert wurde, war der Rollweg zur Startposition für Runway 22 geändert und ein vorab genutzter Rollweg wurde zum Unglückszeitpunkt nicht mehr genutzt. Die Besatzung richtete sich trotz widersprüchlicher Startfreigabe zum Starten auf der kürzeren Starbahn 26 aus und begann den Start. Vorläufige Untersuchungen weisen darauf hin, dass einer der Piloten noch eine Bemerkung zur fehlenden Beleuchtung der Startbahn machte; trotzdem wurde der Start nicht abgebrochen. Die voll beladene CRJ konnte nicht innerhalb der verfügbaren 3500 Fuß Startbahn abheben und überrollte das Ende der Startbahn. Nach Kollision mit mehreren Hindernissen brach Feuer aus. Bei dem Unglück starben 49 Menschen [ANS2006].



Blau: Soll-Pfad via Runway 22

Rot: Ist-Pfad via Runway 26

X geschlossener Rollweg

Quelle: [GAL2006]

Abbildung 33: Roll- und Startweg auf dem Lexington Bluegrass Flughafen

Der abschliessende Bericht der NTSB [NTSB2007] sieht die Unfallursache in dem Versagen der Crew, die vorhandenen Markierungen, Beschilderungen und andere Hilfsmittel auf der Rollfläche und der Startbahn korrekt zu interpretieren und daraus ihre Position auf der inkorrekten Startbahn abzuleiten. Hierzu beigetragen hat die unangemessene Kommunikation der Crew während des Rollens und der hierdurch verursachte Verlust der *Positional Awareness*.

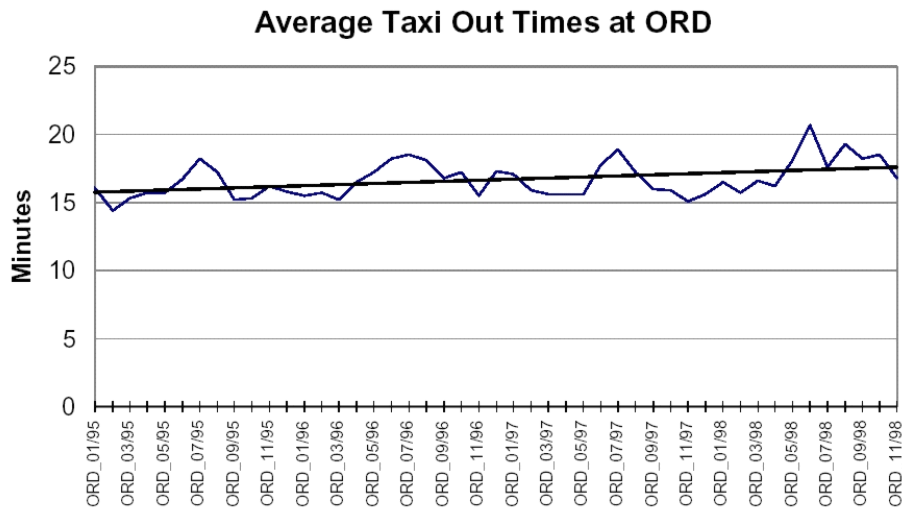
Alle oben aufgeführten Beispiele zeigen, wie eine Verkettung von verschiedenen Faktoren zum Verlust des räumlichen Situationsbewusstseins und in Folge zu Runway-Incursion-Ereignissen führten.

## 5.2 Ökonomische Faktoren von Rolloperationen

Im Rahmen zunehmender Flugbewegungen weltweit verlängert sich auch die Rollzeit auf den Flughäfen. Das Rollen von und zur Start- und Landebahn wird mehr und mehr zur der die Kapazitätsgrenze von Flughafen bestimmenden Operation. Am Beispiel des Flughafens Chicago O'Hare soll der Trend zu einer verlängerten Rollzeit verdeutlicht werden. Im Schnitt



hat sich die Rollzeit innerhalb von 3 Jahren von durchschnittlich 16 Minuten auf 19 Minuten verlängert.



Quelle: [VOSS2000]

Abbildung 34: Entwicklung der durchschnittlichen Rollzeit 1995 – 1998 am Flughafen Chicago O'Hare

Trotz des teilweise relativ kurzen Anteils der Rollzeit and der Gesamtflugzeit bietet die Optimierung der Rollzeit und die damit verbundene Verkehrsflussbeschleunigung ein deutliches Einsparpotential sowohl für Luftfahrtgesellschaften als auch für Flughafenbetreiber:

Für die Luftfahrtgesellschaften verspricht eine Verringerung der Rollzeit insbesondere Einsparungen beim *Fuel Burn* (bis zu 5 Tonnen pro Flug auf großen Flughäfen (eigene Abschätzung basierend auf Fuel Burn Taxiing Frankfurt Flughafen), aber auch durch verringerte allgemeine Betriebs- und Wartungskosten. Für Flughafenbetreiber verspricht eine Verkehrsflussbeschleunigung am Boden die Möglichkeit einer Kapazitätserweiterung bzw. den Kapazitätserhalt bei schlechtem Wetter, denn bei durchschnittlich 1100 Abflügen täglich in Chicago summiert sich die zusätzliche Rollzeit bei drei Minuten Verlängerung auf 55h pro Tag bzw. 20075h pro Jahr auf [Voss2000].

Unter schlechten Sichtbedingungen wie z.B. Wetterminima CAT III B, C kann ein entsprechend ausgestattetes Flugzeug heute zwar landen, jedoch teilweise nicht mehr die Landebahn verlassen und selbstständig rollen. Da es unter schlechten Sichtbedingungen deutlich länger dauert, die Landebahn zu räumen, und die Luftverkehrskontrolle (ATC) bei schlechter Sicht weniger Möglichkeiten hat zu überprüfen, ob die Landebahn geräumt ist, werden die Staffungsabstände beim Anflug erhöht. Somit wird die maximale Anzahl an Flugzeugen, die während einer Stunde landen können, reduziert und die Kapazität des Flughafens hierdurch eingeschränkt.

Daher besitzt die Entwicklung von Konzepten und Systemen zur Reduzierung der Rollzeit und zur Beschleunigung des Verkehrsflusses hohe Bedeutung. Unter dem Aspekt der Verkürzung der Rollzeit wurden bereits mehrere Versuche mit dedizierten Systemen durchgeführt. Dabei wurde zunächst untersucht, inwiefern das Positionsbewusstsein des Piloten, hier spezifisch das Bewusstsein der eigenen Position relativ zum Ziel (der zugewiesenen Startbahn bzw. dem Gate) sowie die genaue Kenntnis der zu folgenden Rollstrecke zu einer Verkürzung der Rollzeit führt:

*“The increased knowledge of exact aircraft placement relative to the airport has been demonstrated to decrease crew workload and improve taxi performance.”* [OEP 2003]

Flugsimulationen mit Surface Moving Map Displays (SMMD, siehe Kapitel 5.3.1), welche von der NASA über einen Zeitraum von mehreren Jahren durchgeführt wurden, wiesen eine signifikante Reduktion der Rollzeit insbesondere unter moderaten bis schlechten



Sichtbedingungen zwischen 16% bis zu 25% nach. Die Ergebnisse der Simulatorversuche wurden später durch Flugversuche, welche im Rahmen von Safe Flight 21 (SF21) in Louisville, KY im Oktober 2000 durchgeführt wurden, bekräftigt. [OEP2003], [Hoo2001]

Insbesondere gesamtheitliche Konzepte wie z.B. *Advanced Surface Movement Guidance Systems* Level 3 und 4 (siehe Kapitel 5.3.2) welche die Rollbewegungen flughafenweit integrieren und durch 4-dimensionale Trajektorienberechnung sowohl strategische (Planungs-)Vorhersagen zur Rollführung zulassen als auch taktische Rollanweisen auf Führungssystemen in das Cockpit übermitteln können, befinden sich gegenwärtig in der Entwicklung [Do-272a]. Sie besitzen besonders hohes Potential zur Verbesserung der Ökonomie des Rollvorgangs, da sie nicht den Rollvorgang eines einzelnen Flugzeuges betrachten, sondern die Gesamtheit aller gegenwärtigen und geplanten Rollvorgänge.

## **5.3 Avioniksysteme zur Erhöhung der Sicherheit und Effizienz von Rolloperationen**

Wie oben bereits erwähnt, wurden bereits mehrere Konzepte und Systeme zur Erhöhung der Sicherheit und Effizienz von Rolloperationen entwickelt. Diese besitzen größtenteils jedoch noch Konzeptstatus bzw. liegen als Prototyp zur wissenschaftlichen Untersuchung vor. Einige Systeme werden jedoch bereits operationell von der Flugverkehrskontrolle und von Piloten im Cockpit genutzt.

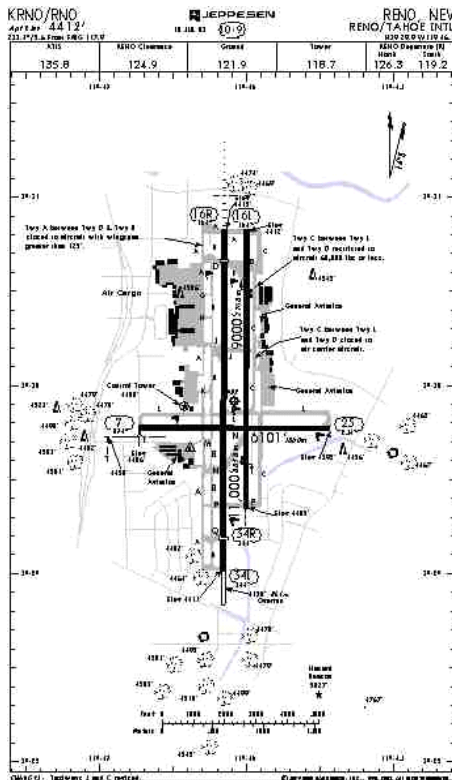
### **5.3.1 Surface Moving Map Displays (SMMD)**

Bei der Entwicklung von Technologien zur Erhöhung der Sicherheit und Effizienz von Rolloperationen, mit dem Schwerpunkt auf der Vermeidung von Runway Incursion steht zunächst die Migration von Papierkarten hin zu digitalen Abbildungen des Flughafenlayouts mit allen wichtigen operativen Objekten im Vordergrund [FAA2003].

*"In the most comprehensive study to date of runway incursion risk mitigation, completed in December 2002, the joint government/industry Runway Incursion Joint Safety Implementation Team, after reviewing more than 800 runway incursion accidents and incidents and considering more than 150 risk mitigation strategies, concluded that the SMMD with own-ship position was judged the most powerful "safety enhancement" to lessen the risk of runway incursions."*

[Moo2004]

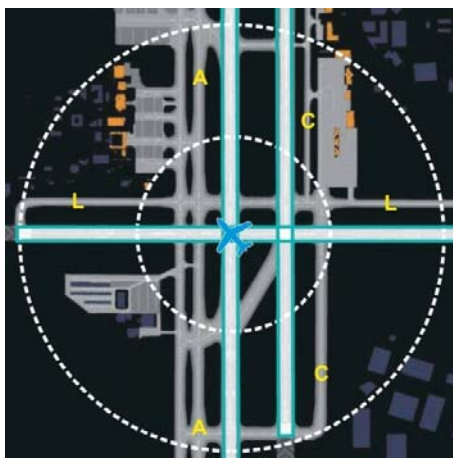
Die Integration räumlicher Flughafenobjekte (wie z.B. Lage der Rollwege, Landebahnen, *Hold-Short-Positions*, etc.) mit zusätzlicher, operationell notwendiger nicht räumlicher Information (wie z.B. Rollwegnamen, Landebahn-*Identifier*, etc.) wird auch als Flughafendatenbank (*Airport Mapping Database – AMDB*) bezeichnet. Wird die aktuelle Flugzeugposition und -kurs aus dem Navigationssystem ausgelesen und eine basierend auf einer Flughafendatenbank generierte elektronische Rollkarte entsprechend der aktuellen Flugzeugposition und -kurs auf einem Anzeigesystem ausgerichtet, so wird ein Abbild der unmittelbaren und weiteren Umgebung der Flughafenrollfläche angezeigt. Diese Avioniksysteme werden als *Airport Surface Moving Map Display (SMMD)* bezeichnet.



Flughafenkarte Reno Jeppesen 10-9  
Quelle: Jeppview, Jeppesen Sanderson ©



Flughafenkarte Reno elektronisch  
Quelle: Eigene Grafik



Exemplarisches SMMD North-Up Mode

Quelle: Eigene Grafik



Exemplarisches SMMD Track-Up Mode

Quelle: Eigene Grafik

Abbildung 35: Flughafenkarte Reno (Papier) Flughafenkarte Reno, exemplarische digitale Darstellung

Seit 2003 befindet sich das Jeppesen Taxiing Positional Awareness (TPA) System auf dem Markt. Mehrere andere SMMDs, wie das Onboard Airport Navigation System (OANS) von Thales, welches für den Airbus 380 entwickelt wurde, befinden sich kurz vor der operationellen Einführung.

Das sich ebenfalls seit 2003 als Upgrade zu dem Honeywell EGPWS auf dem Markt befindliche Honeywell Runway Awareness & Advisory System (RAAS) nutzt ebenfalls Flughafendatenbanken, um die relative Lage des Flugzeugs zur Landebahn zu bestimmen. Im Gegensatz zu den oben genannten Systemen wird im Rahmen von RAAS jedoch nicht die aktuelle Flugzeugposition graphisch dargestellt, sondern akustische Warnungen bezüglich der Annäherung an eine Landebahn, exzessiver Standzeit auf einer Landebahn

sowie verbleibender Startstrecke beim Starten/Landen aus der Flughafendatenbank, der aktuellen Flugzeugposition und Leistungsparametern (Flugzeugkonfiguration, z.B. Take-Off-Configuration) erzeugt. Befindet man sich auf einem Rollweg und hat Startschub gesetzt, so wird automatisch die Warnung „On Taxiway! On Taxiway!“ erzeugt, um einen Taxiway-Takeoff zu vermeiden [Hon2004].

Als Resultat der Untersuchung des Comair-Unglücks in Lexington 2006 (siehe Kapitel 5.1) sprach die NTSB 2007 u.a. die Empfehlung an die FAA aus vorzuschreiben, dass alle Part 91K (Air Charter), 121 (Scheduled Air Carriers) und 135 (Air Charter) Flugzeugbetreiber im Cockpit Surface Moving Map Displays oder andere automatische Systeme installieren lassen, welche den Piloten warnen, falls dieser einen Start von einem Rollweg oder der falschen Startbahn auszuführen versucht.

#### 5.3.2 Advanced Surface Movement Guidance System (A-SMGCS)

*Advanced Surface Movement Guidance System* Level 3 und 4, welche die Rollbewegungen flughafenweit integrieren und in Form von Führungssystemen in das Cockpit integriert werden können, befinden sich in der Entwicklung [Do-272a]. Sie umfassen folgende Funktionalitäten:

- Rollüberwachung, Konflikterfassung und -warnung sowie Runway Incursion Erfassung und Warnung
- Automatisierte Rollführung auf dem Flughafen ohne direkten Einfluss eines Lotsen
- Route/Hold-Short Darstellung und Erfassen und Warnen bei Abweichungen
- Runway Operations

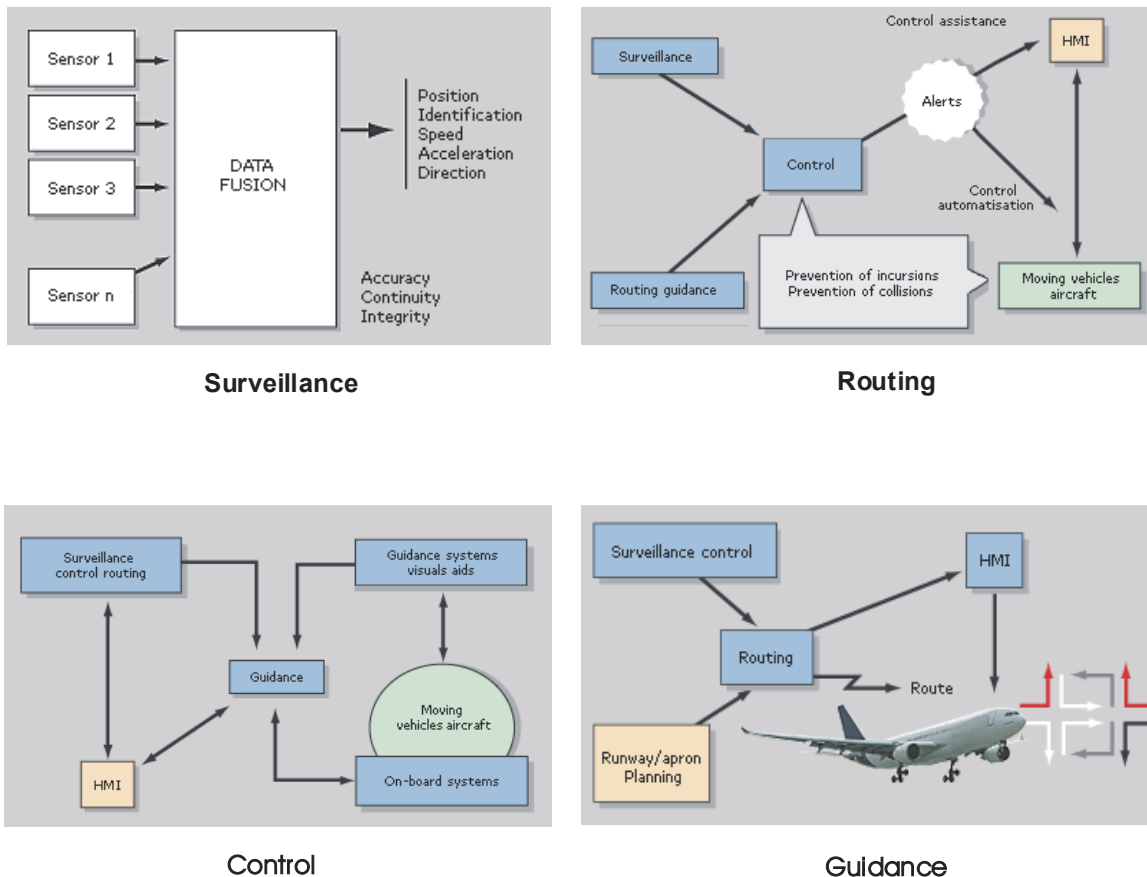
[Do-272a] [ED87a]

Die erweiterte Funktionalität adressiert insbesondere zwei Aspekte der operationellen Flugführung auf dem Flughafen:

1. Erhöhte Sicherheit beim Rollen, Starten und Landen unter schlechten Sichtbedingungen durch erhöhtes räumliches (2-dimensionales) Situationsbewusstsein der Piloten und Lotsen.
2. Erhöhung des Verkehrsflusses auf dem Flughafen durch effiziente Rollführung.

*Advanced Surface Movement Guidance Systems* umfassen vier Basiskomponenten:

- Surveillance
- Routing
- Control
- Guidance



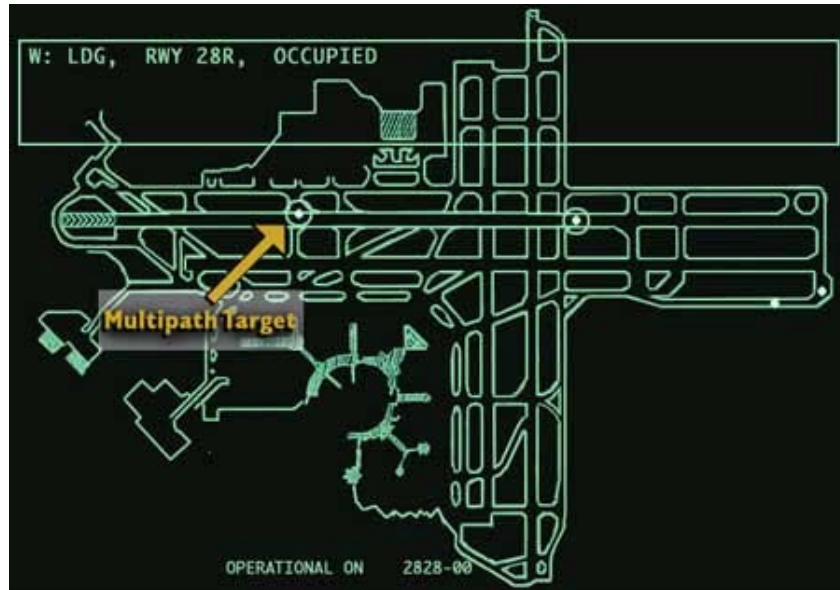
Quelle: [EUR2005]

Abbildung 36: Komponenten von A-SMGCS

Im Rahmen von A-SMGCS sollen die heute genutzte, weitgehend manuelle Kommunikation, Navigation and Surveillance (CNS) schrittweise automatisiert und die Übertragungswege digital und codiert gestaltet werden, um den Anteil an menschlichem Fehler (durch visuelles Erfassen, Sprache, etc.) zu reduzieren. Die Rollführungsanzeige im Cockpit dient hierbei als Schnittstelle zwischen der bodenseitigen Rollführungsleitstelle und dem Piloten als ausführendem Organ im Flugzeug. Für die drei Komponenten Routing, Control und Guidance wird die erforderliche räumliche Information bezüglich der Rollflächen sowie des Start- und Landebahnsystems durch Flughafendatenbanken bereitgestellt.

### 5.3.3 Rollüberwachung, -Konflikterfassung und -warnung sowie *Runway Incursion* Erfassung und Warnung

Beim Rollen setzt der Pilot vom Vorfeldlotsen übermittelte Anweisungen in Steuereingaben um. Die Rollführungsaufgabe liegt beim Vorfeldlotsen, der das Flughafenvorfeld überwacht und aus der Analyse der Gesamtsituation den einzelnen Piloten Anweisungen zum Rollen übermittelt. Zur Verbesserung der Überwachungs- und Führungsfunktion wurden Anzeigesysteme für den Vorfeldlotsen entwickelt, welche den Verkehr auf den Rollwegen sowie Start- und Landebahnen darstellen. Die hierzu verwendete Kombination von Echtzeit-Überwachungsdaten des Flughafens durch Surface Surveillance Radar (SSR) in modifizierter Form (z.B. ASDE-3 Radar) mit einer Flughafendatenbank werden heute bereits als *Aerodrome Movement Area Safety System* (AMASS) an einigen Flughäfen eingesetzt, um ATC Hinweise und Warnungen vor potentiellen Konfliktsituationen zu liefern. Die räumliche Information zum Flughafenlayout wird aus der Flughafendatenbank gewonnen. [Do-272a]



Quelle: [Vol2000]

Abbildung 37: Aerodrome Movement Area Safety System (AMASS)

Mit der bevorstehenden Einführung von ADS-B (Automatic Dependant Surveillance Broadcast) und TIS-B (Traffic Information Surveillance-Broadcast) Datenlink-Service werden Überwachungsdaten des Flughafens auch Nicht-ATC-Nutzern zugänglich, sogar auf ATC-unkontrollierten Flugplätzen. In Kombination mit den räumlichen Informationen aus einer entsprechend genauen Flughafendatenbank kann die Position und Bewegung anderer Flugzeuge auf dem Flughafen und relativ zur eigenen Position in Form von *Cockpit Display of Traffic Information* (CDTI) dargestellt werden. Hierdurch sollen potentielle Konfliktsituationen beim Rollen aufgedeckt und *Runway Incursions* vermieden werden. [Do-272a]

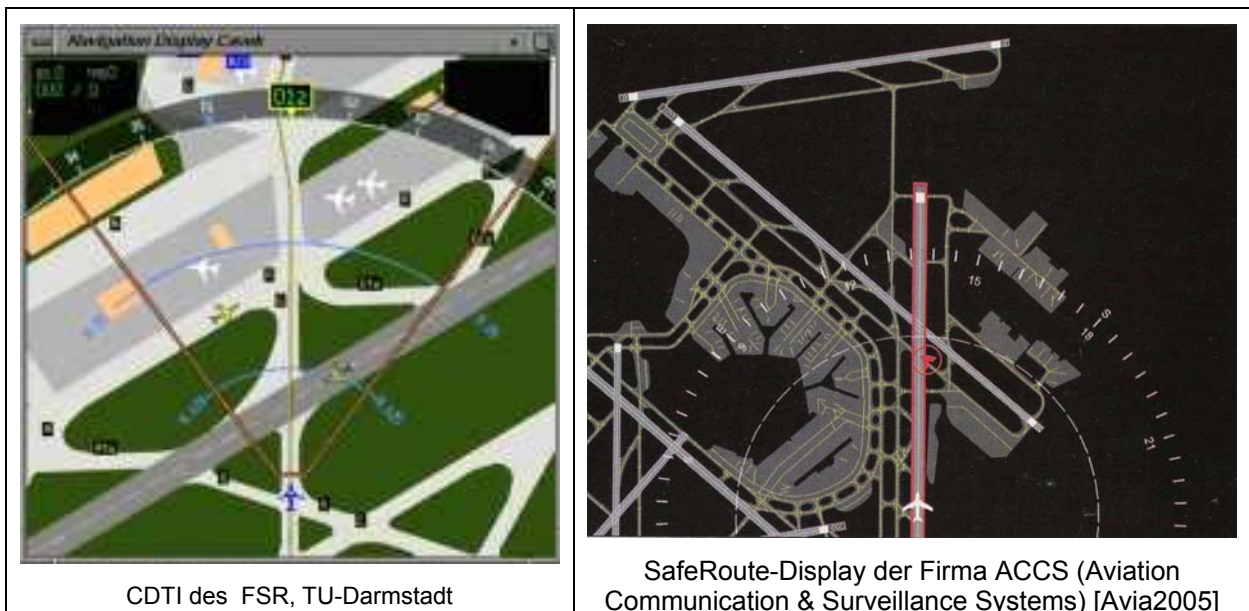
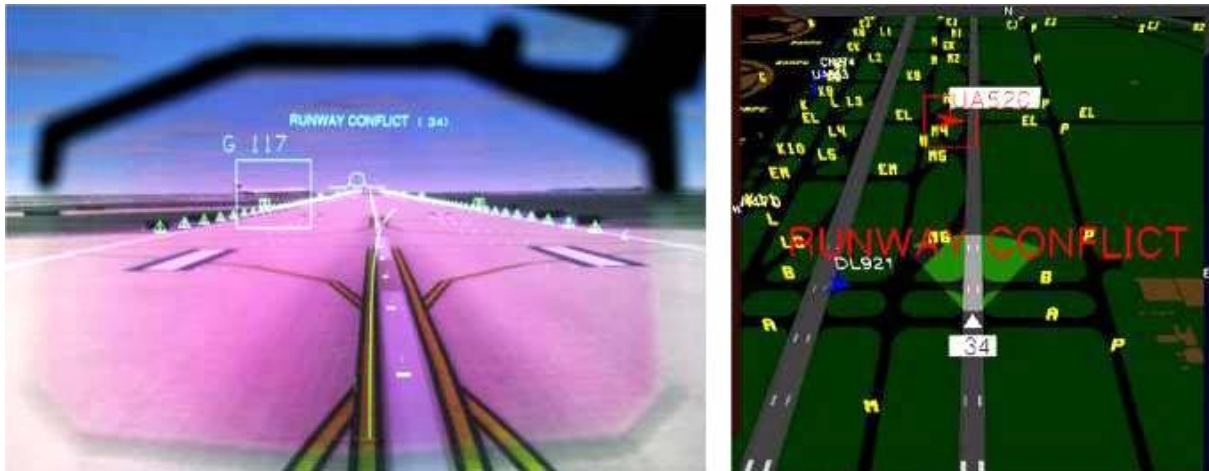


Abbildung 38: Cockpit Display of Traffic Information (CDTI) mit Überlagerung von Eigenposition und Position von Fremdflugzeugen auf einer Flughafendatenbank





Quelle: [NASA2001]

Abbildung 39: NASA Runway Incursion Prevention System (RIPS)

Links in Form eines stereoskopischen Head-Up Displays mit Überlagerung von dem aus einer Flughafendatenbank gewonnenem Flughafenlayout und Konfliktwarnungen auf reale Flughafenobjekte und rechts als synthetische Darstellung in einer perspektivischen Projektion

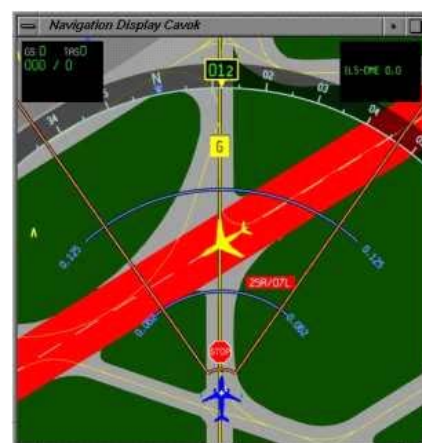
### 5.3.4 Rollführung auf dem Flughafen sowie Route/Hold-Short Darstellung

Im heutigen operationellen Flughafenumfeld empfangen die Piloten ihre Rollrouten von der Parkposition zur aktiven Startbahn bzw. von der Landebahn zur Parkposition vom Vorfeldlotsen per Funk. Auch Hold-Short Anweisungen werden vom Vorfeldlotsen an den Piloten übermittelt, um Kollisionen und Runway Incursion zu vermeiden. Der Pilot muss sich die Anweisungen merken und gegenlesen; teilweise werden sie vom Piloten notiert. Mithilfe von Flughafenkarten und der Rollwegbeschilderung folgt der Pilot dann der angewiesenen Rollroute. Sprachliche Verständnisprobleme, schlechte Funkübertragung und mangelhafte, abgenutzte Rollwegbeschilderungen bergen bei der klassischen Rollführung ein erhebliches Gefahrenpotential.

Im Rahmen einer Rollführungsanwendung wird die zu folgende Route digital übertragen und kann auf einem Display graphisch als Überlagerung auf dem aus einer Flughafendatenbank erzeugtem Flughafenlayout dargestellt werden:



Rollführung (gelbe dicke Linie)

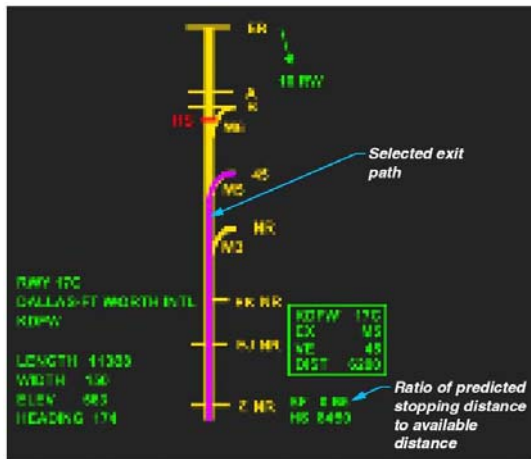


Hold-Short Anweisung auf Rollführungsanzeige

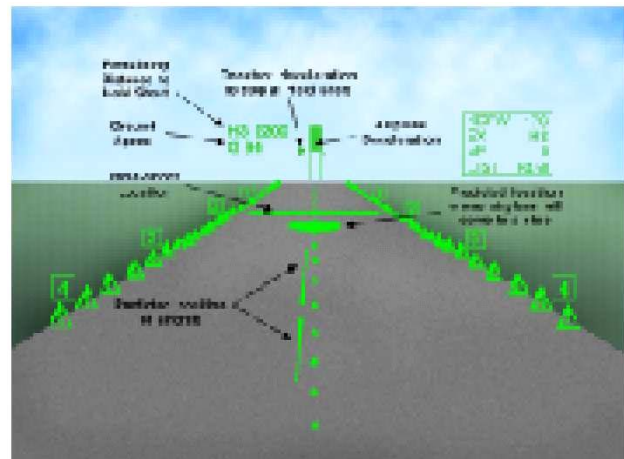
Quelle: FSR, TU-Darmstadt

Abbildung 40: Rollführungsanzeige

Fehlinterpretationen der Rollanweisungen wegen sprachlichen Verständnisproblemen und Fehlführung wegen schlecht sichtbarer Rollwegbeschilderungen z.B. bei schlechtem Wetter können so vermieden werden. Hold-Short-Anweisungen für das Queren von Rollwegkreuzungen sowie für das Aufrollen auf Landebahnen können in Form von Symbolen an der zutreffenden Stelle des Flughafenlayouts dargestellt werden und bieten so Hinweise bezüglich auszuführender Haltemanöver [Do-272a]. Ebenso können Hold-Short Anweisungen auf Landebahnen bei Land-and-Hold-Short Operations bei Flughäfen mit sich kreuzenden Start- und Landebahnssystem dargestellt werden.



NASA Hold Short Advisory Landing Technology (HSALT) Head-Down-Display



NASA HSALT Head-up Display

Quelle: [NASA2001a]

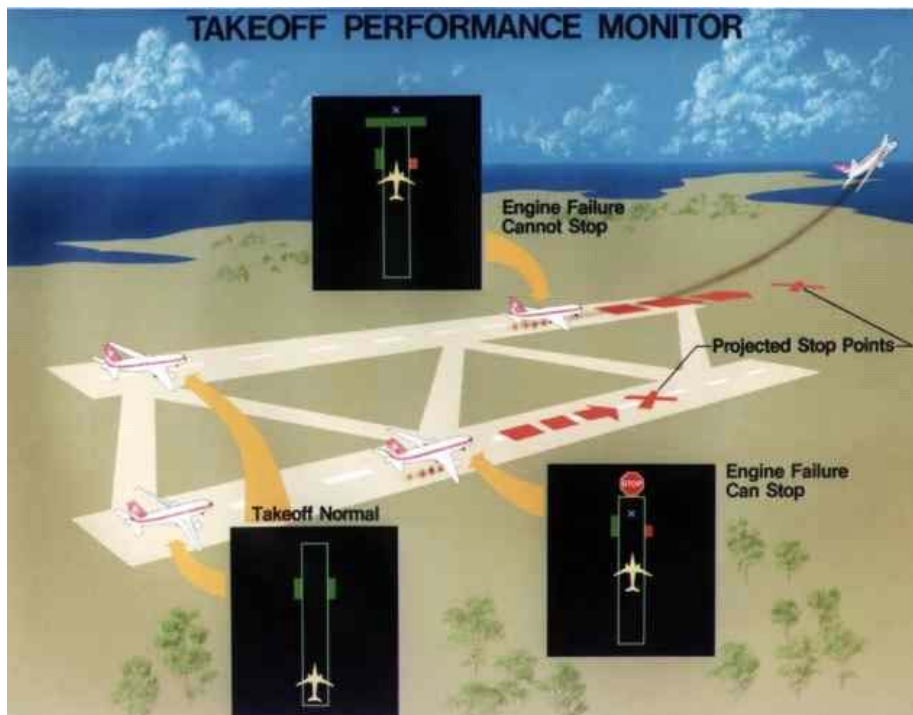
Abbildung 41: Hold-Short-Anweisung für Landebahnen mit Land-and-Hold-Short Operations.

### 5.3.5 Runway Operations

Runway Operations Systeme beschäftigen sich mit räumlichen Belangen des Start- und Landevorgangs und umfassen die Berechnung und Darstellung

- von der zu jedem Zeitpunkt des Start- bzw. Landevorgangs verfügbaren Rollstrecke.
- ob die verfügbare Landerollstrecke noch ausreicht (Brake Power Management).
- der Position, an welcher das Flugzeug die Entscheidungs- bzw. Rotationsgeschwindigkeit erreicht.
- ob die verfügbare Rollstrecke für einen Startabbruch noch ausreicht.

Hierzu werden die benötigten Parameter aus einer Flughafendatenbank entnommen und zusammen mit Umgebungsvariablen wie z.B. der aktuellen Geschwindigkeit, Startgewicht und Wetterbedingungen analysiert. Hierauf basierend können dem Piloten in Echtzeit graphische oder akustische Hinweise zu operationeller Startdurchführung gegeben werden. Ein Beispiel für ein Takeoff Performance Monitoring System ist das NASA TOPMS.



Quelle: [NASA1993]

Abbildung 42: NASA Takeoff Performance Monitoring System (TOPMS)



## 6 Definition von Datenanforderungen an Flughafen-datenbanken

Aufgrund der steigenden Nachfrage nach Avioniksystemen zur Erhöhung der Sicherheit und Effizienz von Rolloperationen auf Flughäfen stieg die Nachfrage nach Flughafendatenbanken als Datenbasis für diese Systeme. Das amerikanische Standardisierungskonsortium RTCA und dessen europäisches Gegenstück EUROCAE reagierten 1998 auf Nachfragen der Luftfahrtindustrie und gründeten das RTCA SC-193/EUROCAE WG 44 mit dem Ziel, Dateninhalts- und Datenqualitätsanforderungen für Flughafendatenbanken zu bestimmen, um Datenerzeugern eindeutige Richtlinien zum Erstellen von Flughafendatenbanken vorzugeben. Das erste Meeting fand im Mai 1998 in Washington, DC. statt; nach 11 weiteren Meetings wurde ein Datenanforderungskatalog für Flughafendatenbanken als Industriestandard RTCA Do-272/EUROCAE ED-99 *User Requirements for Aerodrome Mapping Information* im Oktober 2001 publiziert. Basierend auf der industrieseitigen Erfahrung, welche im Rahmen der umfangreichen Erzeugung von Flughafendatenbanken gewonnen wurde, wurde der Standard in den Jahren 2003 – 2005 erneut angepasst und als RTCA Do-272a/EUROCAE ED-99a *User Requirements for Aerodrome Mapping Information* 2005 publiziert.

Im Rahmen der RTCA SC-193/EUROCAE WG 44 kamen Vertreter aus Industrie und Forschung zusammen, die entsprechend der Luftfahrtdatenkette verschiedene Datenersteller, Datenaufbereiter, Datenintegrierer sowie Anwendungen vertraten. Der Autor vertrat die Inhaltsanforderungen der am Institut für Flugsysteme und Regelungstechnik der TU-Darmstadt (FSR) entwickelten Rollführungssysteme (siehe Abbildung 40). Die für diese Systeme benötigten Dateninhalte wurden im Rahmen seiner Forschungstätigkeit und seiner Diplomarbeit [FRI1999] spezifiziert.

### 6.1 Definition der Anwendungen

Im Rahmen der RTCA SC-193/EUROCAE WG 44 wurden verschiedene Anwendungen vertreten. Ihnen gemeinsam ist das räumliche Einsatzgebiet, welches die operationell genutzten Bereiche von Flughäfen umschliesst und die Art der benötigten Information, nämlich die digitale Abbildung räumlicher Objekte des Flughafens zur Darstellung bzw. zur Berechnung von graphischen oder akustischen Warnhinweisen. Zunächst waren lediglich Vertreter der in Kapitel 5.3 aufgeführten Avioniksysteme vertreten. Aufgrund industrieseitiger Nachfrage wurde der Umfang der vertretenen Anwendungen jedoch um luftfahrtkartographische Anwendungen, Flugsimulation und *Emergency* und *Security*-Anwendungen erweitert.

Hieraus ergibt sich folgende Liste von Anwendungen, für welche ein gemeinsamer Dateninhalts- und Qualitätskatalog geschaffen werden sollte:

- Luftfahrtkartographie
- Flugsimulation
- *Emergency* und *Security*
- *Runway Operations* Systeme
- *Airport Surface Moving Map Displays* (SMMD)
- Runway Awareness & Advisory System
- Rollüberwachungssysteme
- Rollkonflikterfassungs- und –Warnungssysteme

- *Runway Incursion* Erfassungs- und Warnungssysteme
- Rollführungssysteme
- Systeme zur *Route/Hold-Short* Darstellung und Warnung bei Abweichungen

[Do-272a]

## 6.2 Definition der Dateninhalte

Zur Definition der Anforderungen an die Dateninhalte mussten die einzelnen Anwendungen analysiert werden, um festzustellen, welche Dateninhalte und Datenqualität sie zur Erfüllung der beabsichtigten Funktionalität benötigen [ISO8402]. Bei der Inhaltsdefinition von Flughafendatenbanken wurde von Beginn an eine dem räumlichen Charakter von Flughafendaten (räumlich diskrete Entitäten, Klassenbildung, Objektbildung, topologische und funktionelle Zusammenhänge zwischen Entitäten derselben und verschiedener Klassen) angepasste Definition der Dateninhalte unterstützt. Hierdurch wurde die Abbildung der Information in einem dem räumlichen Datencharakter am besten entsprechendem GIS-Vektorobjektmodell ermöglicht.

Hierzu wurde erforderliche Information zunächst in zwei Komponenten unterteilt:

1. Form und Lage von räumlichen Entitäten beschreibende Information (Vektorobjekte)
2. Beschreibende Information zu den räumlichen Entitäten (Attribute)

Die räumlichen Entitäten eines Flughafens wurden im Rahmen der Arbeit von RTCA SC-193/EUROCAE WG-44 nach räumlichen und operationellen Merkmalen zunächst in sechs Oberklassen gegliedert. Innerhalb der sechs Oberklassen wurden die eigentlichen Klassen spezifiziert, welche Entitäten mit spezifischen operationellen und räumlichen Merkmalen umfassen. Hierbei wurden zur Abbildung in einem GIS-Vektorobjektmodell real existierende Objekte durch die geometrische Primitiven Punkt, Linie und Polygon abstrahiert. Die Zuordnung der geometrischen Primitiven zu einer Datenklasse erfolgte unter anwendungsspezifischen operationellen Gesichtspunkten bezüglich des Generalisierungsgrades

Folgende Oberklassen und Datenklassen wurden spezifiziert:

### 1. Runway-Oberklasse:

- *Runway-Element* Klasse
- *Runway Intersection* Klasse
- *Threshold Point* Klasse
- *Runway Marking* Klasse
- *Runway Displaced Area* Klasse
- *Painted Centerline* Klasse
- *Land and Hold Short Location (LAHSO)* Klasse
- *Arresting Gear Location* Klasse
- *Runway Shoulder* Klasse
- *Stopway* Klasse

2. **Helipad-Oberklasse:**

- *Final Approach and Takeoff Area (FATO)* Klasse
- *Touch Down and Lift Off Area (TLOF)* Klasse
- *Helipad Threshold* Klasse

3. **Taxiway-Oberklasse:**

- *Taxiway Element* Klasse
- *Taxiway Shoulder* Klasse
- *Taxiway Guidance Line* Klasse
- *Taxiway Intersection Marking* Klasse
- *Taxiway Holding Position* Klasse
- *Runway Exit Line* Klasse
- *Frequency Area* Klasse

4. **Apron-Oberklasse:**

- *Apron Polygon* Klasse
- *Stand Guidance Line* Klasse
- *Parking Stand Location* Klasse
- *Parking Stand Area* Klasse
- *Deicing Area* Klasse
- *Aerodrome Reference Point* Klasse
- *Service Road* Klasse

5. **Vertical Structures-Oberklasse:**

- *Vertical Polygonal Structure* Klasse
- *Vertical Point Structure* Klasse
- *Vertical Line Structure* Klasse

6. **Construction Area-Oberklasse:**

- *Construction Area* Klasse

[Do-272a]

Appendix A gibt eine Übersicht über die räumliche Ausprägung der Datenklassen.

Basierend auf dem Informationsbedarf der vertretenen Anwendungen wurde zu jeder Datenklasse eine Reihe von beschreibender Information spezifiziert. Sie lässt sich ihrem Inhalt nach in drei Gruppen gliedern:

**A. Information zur Datenklasse und Datenqualität:**

- Datenklasse (Landebahn, Rollweg, Apron, etc.)
- Numerische Datenqualität und Datenursprung (Genauigkeit, Auflösung, Gültigkeitsdatum, etc.)

**B. Metrische und klassifizierte Information**

- Distanzen, Höhenangaben, Winkel, Frequenzen (metrisch)
- Klassifizierte räumliche Ausprägung (z.B. die Unterteilung von Gebäuden in Tower, Hangar, Terminal, Tank, etc.)

**C. Operationelle Eigenschaften**

- Benennung (z.B. Landebahn 25L, Rollweg A)
- Restriktionen (zugelassene Flugzeugtypen, Richtungsangaben)
- Temporäre Objekteigenschaften (Nutzbarkeit, z.B. Rollweg geöffnet/geschlossen)

Die Information zur Datenqualität und zur Datenklasse wird für jedes Datenelement benötigt. Sie soll ermöglichen, dass die Datenqualität für jedes einzelne Datenelement zu identifizieren ist. Die spezifizierten Dateninhalte werden in Form eines Datenkatalogs in RTCA Do-272a publiziert und sind in vorliegender Arbeit in Appendix A aufgeführt.

### **6.3 Definition der benötigten Datenqualität**

Die Definition der benötigten Datenqualität für Flughafendatenbanken erfolgte im Rahmen der Arbeit von RTCA SC-193/EUROCAE WG 44 basierend auf den sieben Datenqualitätsparameter Genauigkeit, Auflösung, Integrität, Verfolgbarkeit, Aktualität, Vollständigkeit und Format.

Für die drei Datenqualitätsparameter mit singulärer Ausprägung (Verfolgbarkeit, Aktualität, Vollständigkeit) wurde in Anlehnung an [ICAO15] und [Do200a] die Ausprägung „ist zu erfüllen“ definiert. Das bedeutet, dass im Rahmen einer Luftfahrt Datenkette für Flughafendaten Prozesse so ausgelegt werden müssen, dass sie Verfolgbarkeit, Aktualität und Vollständigkeit laut ihrer Definitionen gewährleisten. Für die erforderliche Aktualität von Flughafendatenbanken wurde ein Revisionszyklus von 28 Tagen definiert. Die Auswahl dieses kürzesten AIRAC-Revisionszyklus reflektiert die hohe Dynamik des Flughafenlayouts mit häufigen Änderungen insbesondere der Markierungselemente, die Auswirkungen auf die Rollführung haben.

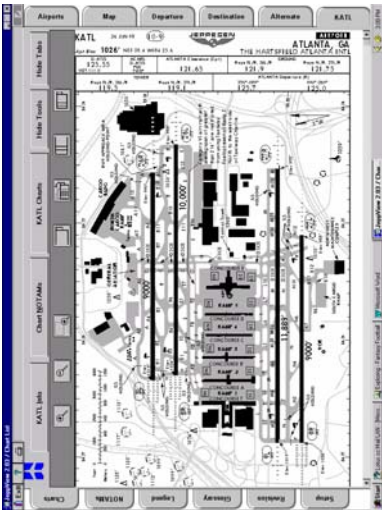
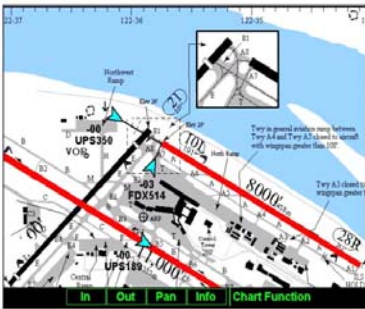



Die Beschreibung eines Austauschformats für Flughafendatenbanken wurde ebenfalls im Rahmen der Arbeit von RTCA SC-193/EUROCAE WG 44 behandelt und ist in Kapitel 0 aufgeführt.

Die Ausprägung der numerischen Datenqualitätsparameter (Genauigkeit, Auflösung, Integrität) wurde für jede in Kapitel 6.2 spezifizierte Datenklasse einzeln in Bezug auf die zu erfüllende Funktionalität der betrachteten Zielanwendungen durchgeführt.

### **6.3.1 Definition der Anforderungen an Integrität, Genauigkeit und Auflösung für Datenelemente einer Flughafendatenbank**

Bei der Definition der Anforderungen zeigte sich, dass sich die im Komitee vertretenen Anwendungen insbesondere hinsichtlich benötigter Integrität und Genauigkeit stark voneinander unterschieden. Eine Mittelung der numerischen Anforderungen schlosse die Nutzung der erzeugten Daten für einige Anwendungen aus. Die Übernahme der kritischsten Anforderungen bedeutete eine hohe finanzielle Bürde bei der Datenakquisition für Anwendung mit geringeren Anforderungen.

Als Lösung wurden eine Kategorisierung der Anforderungen in mehrere Klassen bezüglich Integrität und Genauigkeit ausgearbeitet. Hierzu wurden die Anwendungen bezüglich ihrer Datenqualitätsanforderungen in drei Klassen mit ähnlichen Anforderungen aufgeteilt. Aus der Gesamtheit der betrachteten Anwendungen (siehe Kapitel 6.1) wurden folgende Kategorien bezüglich der drei Datenqualitätsanforderungen erstellt:

<b>Flughafendatenbanken für kartographische Anwendungen</b>  Anforderungsklasse „Coarse“  (Geringe Datenqualitätsanforderungen)	<b>Flughafendatenbanken für Überwachungsanwendungen</b>  Anforderungsklasse „Medium“  (Mittlere Datenqualitätsanforderungen)	<b>Flughafendatenbanken für Navigationsanwendungen</b>  Anforderungsklasse „Fine“:  (Hohe Datenqualitätsanforderungen)
<b>Anwendungen:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Luftfahrtkartographie</li> <li>- Flugsimulation</li> <li>- Notfall- und Sicherheitsanwendungen</li> </ul>	<b>Anwendungen:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Runway Operations Systeme</li> <li>- Airport Surface Moving Map Displays (SMMD)</li> <li>- Runway Awareness &amp; Advisory System</li> <li>- Rollüberwachungssysteme</li> <li>- Rollkonflikterfassungs- und –Warnungssysteme</li> <li>- Runway Incursion Erfassungs- und Warnungssysteme</li> </ul>	<b>Anwendungen:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Rollführungssysteme</li> <li>- Systeme zur Route/Hold-Short Darstellung und Warnung bei Abweichungen</li> </ul>
	 	 

Quelle: [Youn2004] , [Do-272a]

Tabelle 1: Anwendungsklassen RTCA SC-193/EUROCAE WG44

**Anmerkung:** Aus heutiger Sicht wäre die Anforderung an Flugsimulation als „Medium“ oder strenger zu definieren, da ansonsten Positionsdiskrepanzen zwischen in der Simulation genutzten Bordinstrumenten mit eigenen hochgenauen Datenquellen und der basierend auf niedrigen Datenquellen erstellten Simulationsumgebung auftreten können.

Innerhalb jeder Anforderungsklasse (Coarse, Medium und Fine) wurden für die in Kapitel 6.2 aufgezählten Datenklassen Anforderungen an die Positionsgenauigkeit, Auflösung und Integrität definiert. Die Zuweisung von Anforderungen an Positionsgenauigkeit und Integrität zu den Datenelementen jeder Anwendungskategorie erfolgte nach folgenden Gesichtspunkten:

1. Publierte Anforderungen ICAO
2. Anwendungsbezogene Risikoanalyse
3. Unterscheidung der in Kapitel 6.2 definierten Dateninhalte in real existierende (d.h. sichtbare) räumliche Objekte und virtuelle räumliche Objekte.
4. Bedeutung des Datenelementes zur Ausführung der „Intended Function“.

Zunächst wurden bereits existierende Anforderungen (insbesondere solche aus ICAO Annex 4, 14, 15 und ICAO Document 9674) [YOU2004] als Grundlage genutzt, um einzelnen Datenklassen Anforderungen an Positionsgenauigkeit und Integrität zuzuweisen. Hierdurch sollte gewährleistet werden, dass Elemente einer Flughafendatenbank auch im Rahmen bereits existierender ICAO-Standards und Verfahren (SARPS) genutzt werden können. Im nächsten Schritt wurden diese Anforderungen mit aus Risikoanalysen abgeleiteten Anforderungen (insbesondere der Risikoanalyse „Development of Airport Surface Required Navigation Performance“ [NASA1999]) auf operationelle Ratio überprüft und wenn notwendig die strengere Anforderung übernommen. Um die Anforderungen für virtuelle und real existierende Objekte unterscheiden zu können, wurden in Anlehnung an [ICAO14], [ICAO15], [ICAO4] und [ICAO9674] eine Klassifizierung der Erstellungsmethode in *Surveyed* (mit geodätischen Methoden eingemessen) und *Calculated* (basierend auf operationellen Zusammenhängen berechnet) unterschieden. Berechneten Daten wurde eine geringere Integrität und Positionsgenauigkeitsanforderung zugewiesen als vermessenen Objekten.

Innerhalb der Anforderungsklasse „Fine“ erfolgte eine Abstufung der Anforderungen in Abhängigkeit davon, ob ein Datenelement unmittelbare Führungsfunktionen übernimmt (z.B. Taxiway Guidance Line), mittelbar an der Führungsfunktion beteiligt ist (z.B. Taxiways) oder lediglich zum Verbessern des räumlichen Situationsbewusstseins dient (z.B. Taxi Shoulders).

Die Anforderung an die Auflösung wurde in Bezug zur definierten Genauigkeitsanforderung gesetzt und so gewählt, dass einfache und doppelte Rundungsfehler beim Verarbeiten und Anwenden der Daten vermieden wurden.

#### 6.3.1.1 Anforderungen an Genauigkeit für Datenelemente von Flughafen-datenbanken

Für die drei Anforderungskategorien *Coarse*, *Medium* und *Fine* wurden folgende Anforderungen an die **Positionsgenauigkeit** definiert:

Datenklasse	Anforderung <b>Lagegenauigkeit</b> [m] je Anforderungskategorie			Daten- erstellungsart
	Fine	Medium	Coarse	
Runway Element	1	5	30	Surveyed
Runway Intersection	1	5	30	Surveyed
Runway Threshold	1	5	NS	Surveyed
Painted Centerline	0.5	NS	NS	Surveyed
LAHSO	1	5	NS	Surveyed
Arrest Gear Location	1	5	30	Surveyed
Runway Shoulder	1	5	30	Surveyed
Stopway	1	5	30	Surveyed
Runway Displaced Area	1	5	30	Surveyed
Runway Marking	NS	NS	NS	As Charted
FATO	1	5	5	Surveyed
TLOF	1	5	5	Surveyed
Helipad Threshold	1	5	NS	Surveyed
Taxiway Element	1	5	5	Surveyed
Taxiway Shoulder	1	5	5	Surveyed
Taxiway Guidance Line	0.5	NS	NS	Surveyed
Taxiway intersection marking	0.5	NS	NS	Surveyed
Taxiway holding position	1	5	NS	Surveyed
Runway Exit line	0.5	NS	NS	Surveyed
Frequency area	NS	NS	NS	Calculated
Apron	1	5	30	Surveyed
Stand guidance line	0.5	NS	NS	Surveyed
Parking stand location	0.5	5	30	Surveyed
Parking stand area	1	5	30	Calculated
Deicing area	1	5	30	Surveyed
Verical polygonal objects	0.5	5	30	Surveyed
Vertical point objects	0.5	5	30	Surveyed
Vertical line objects	0.5	5	30	Surveyed
Construction area	1	5	5	Surveyed
Aerodrome reference point	30	30	30	Calculated
Survey control point	0.5	0.5	NS	Surveyed
Aerodrome boundary	NS	NS	NS	Calculated
Service Road	1	5	30	Surveyed

NS: Keine Anforderungen bezüglich der Positionsgenauigkeit definiert

Quelle: [Do-272a]

Tabelle 2: Positionsgenauigkeitsanforderungen für die horizontale Komponente von Datenklassen einer Flughafendatenbank

Das zur Spezifizierung der Positionsgenauigkeit erforderliche Vertrauensintervall wurde mit 95% für die Anforderungsklasse *Fine* und mit 90% für die Anforderungsklassen *Medium* und *Coarse* definiert [Do-272a].



### 6.3.1.2 Anforderungen an Integrität für Datenelemente von Flughafendatenbanken

Die erforderliche Integrität wurde nach ICAO in Routine Data (R, Integrität =  $10^{-3}$ ), Essential Data (E, Integrität =  $10^{-5}$ ) und Critical Data (C, Integrität =  $10^{-8}$ ) klassifiziert [ICAO15]. Für die drei Anwendungsklassen *Coarse*, *Medium* und *Fine* wurden folgende Anforderungen an die Integrität definiert.

	Anforderung <b>Integrität</b> [m] je Anforderungskategorie		
<b>Datenklasse</b>	Fine	Medium	Coarse
Runway Element	C	-	-
Runway Intersection	C	-	-
Runway Threshold	C	-	-
Painted Centerline	C	-	-
LAHSO	R	-	-
Arrest Gear Location	-	-	-
Runway Shoulder	-	-	-
Stopway	-	-	-
Runway Displaced Area	C	-	-
Runway Marking	-	-	-
FATO	C	-	-
TLOF	C	-	-
Helipad Threshold	C	-	-
Taxiway Element	-	-	-
Taxiway Shoulder	-	-	-
Taxiway Guidance Line	C	-	-
Taxiway Intersection Marking	C	-	-
Taxiway Holding Position	-	-	-
Runway Exit line	C	-	-
Frequency area	-	-	-
Apron	-	-	-
Stand Guidance Line	E	-	-
Parking Stand Location	E	-	-
Parking Stand Area	-	-	-
Deicing Area	-	-	-
Vertical Polygonal Objects	E	-	-
Vertical Point Objects	E	-	-
Vertical Line Objects	E	-	-
Construction Area	-	-	-
Aerodrome Reference Point	R	R	R
Survey Control Point	E	E	
Aerodrome Boundary	-	-	-
Service Road	-	-	-

Quelle: [Do-272a]

Tabelle 3: Integritätsanforderungen für Datenklassen einer Flughafendatenbank

### 6.3.1.3 Anforderungen an Auflösung für Datenelemente von Flughafendatenbanken

Zum Vermeiden von einfachen und doppelten Rundungsfehlern wurde die Anforderung an die Auflösung in Bezug zur spezifizierten Positionsgenauigkeitsanforderung gewählt. Hierzu wurde 1/10 bzw. 1/5 der erforderlichen Positionsgenauigkeit angesetzt.

Für die drei Anwendungsklassen *Coarse*, *Medium* und *Fine* wurden folgende Anforderungen an die Auflösung definiert:

	Anforderung <b>Auflösung</b> [m] je Anforderungskategorie		
<b>Datenklasse</b>	Fine	Medium	Coarse
Runway Element	0.1	0.1	1
Runway Intersection	0.1	0.1	1
Runway Threshold	0.1	0.1	NS
Painted Centerline	0.01	0.1	NS
LAHSO	0.1	0.1	NS
Arrest Gear Location	0.1	0.1	1
Runway Shoulder	0.1	0.1	1
Stopway	0.1	0.1	1
Runway Displaced Area	0.1	0.1	1
Runway Marking	NS	NS	NS
FATO	0.1	0.1	1
TLOF	0.1	0.1	1
Helipad Threshold	0.1	0.1	NS
Taxiway Element	0.1	0.1	1
Taxiway Shoulder	0.1	0.1	1
Taxiway Guidance Line	0.01	0.1	NS
Taxiway Intersection Marking	0.01	0.1	NS
Taxiway Holding Position	0.1	0.1	NS
Runway Exit line	0.01	0.1	NS
Frequency area	NS	NS	NS
Apron	0.1	0.1	1
Stand Guidance Line	0.01	0.1	NS
Parking Stand Location	0.01	0.1	1
Parking Stand Area	0.1	0.1	1
Deicing Area	0.1	0.1	1
Vertical Polygonal Objects	0.1	0.1	1
Vertical Point Objects	0.1	0.1	1
Vertical Line Objects	0.1	0.1	1
Construction Area	0.1	0.1	0.1
Aerodrome Reference Point	0.1	1	1
Survey Control Point	0.01	0.01	NS
Aerodrome Boundary	NS	NS	NS
Service Road	0.1	0.1	1

NS: Keine Anforderungen bezüglich der Positionsgenauigkeit definiert

Quelle: [Do-272a]

Tabelle 4: Auflösungsanforderungen für positionsbeschreibenden Elemente der Datenklassen einer Flughafendatenbank [Do-272a]

## 6.4 Beschreibung eines standardisierten Austauschformates

Innerhalb der Luftfahrt Datenkette bestehen 3 Schnittstellen zwischen Kettengliedern, für die ein Austauschformat bestimmt werden muss (siehe Abbildung 28):

- 1.) Zwischen der Datenerstellung und der Datenaufbereitung
- 2.) Zwischen Datenaufbereitung und Datenintegration
- 3.) Zwischen Datenintegration und Anwendung

Die Bestimmung eines Austauschformates zwischen Datenerstellung und Datenaufbereitung erfolgte ebenso wie die Bestimmung von Inhalt und Datenqualitätsanforderungen von Flughafendatenbanken im Rahmen des RTCA SC-193/EUROCAE WG-44. Die Beschreibung des standardisierten Austauschformates wurde in dem Dokument RTCA Do-291/EUROCAE ED-119 „Interchange Standards for Terrain, Obstacle and Aerodrome Mapping Information“ veröffentlicht [Do291].

Die Erarbeitung eines standardisierten Austauschformates für Flughafendatenbanken zwischen Datenerstellung und Datenaufbereitung baut auf den in RTCA Do-272a beschriebenen Dateninhalts- und Datenqualitätsanforderungen auf [Do-272a]. Um die definierte Datenqualität in Bezug auf die Datenqualitätsparameter Vollständigkeit, Auflösung, Verfolgbarkeit und Aktualität während des Datenaustauschvorgangs gewährleisten zu können, mussten folgende Faktoren berücksichtigt werden:

- Die Datenklassen mussten mit räumlichen und beschreibenden Komponenten im Austauschformat abgebildet werden können (Sicherstellen der Vollständigkeit).
- Die definierten Anforderungen an die Auflösung von Koordinaten zur Abbildung von Datenelementen mussten berücksichtigt werden (Sicherstellen der Auflösung).
- Metadaten zur Beschreibung von Referenzsystemen, zeitlichen Bezügen und Datenprozessierungsschritten mussten abgebildet werden können (Sicherstellen der Verfolgbarkeit und Aktualität).

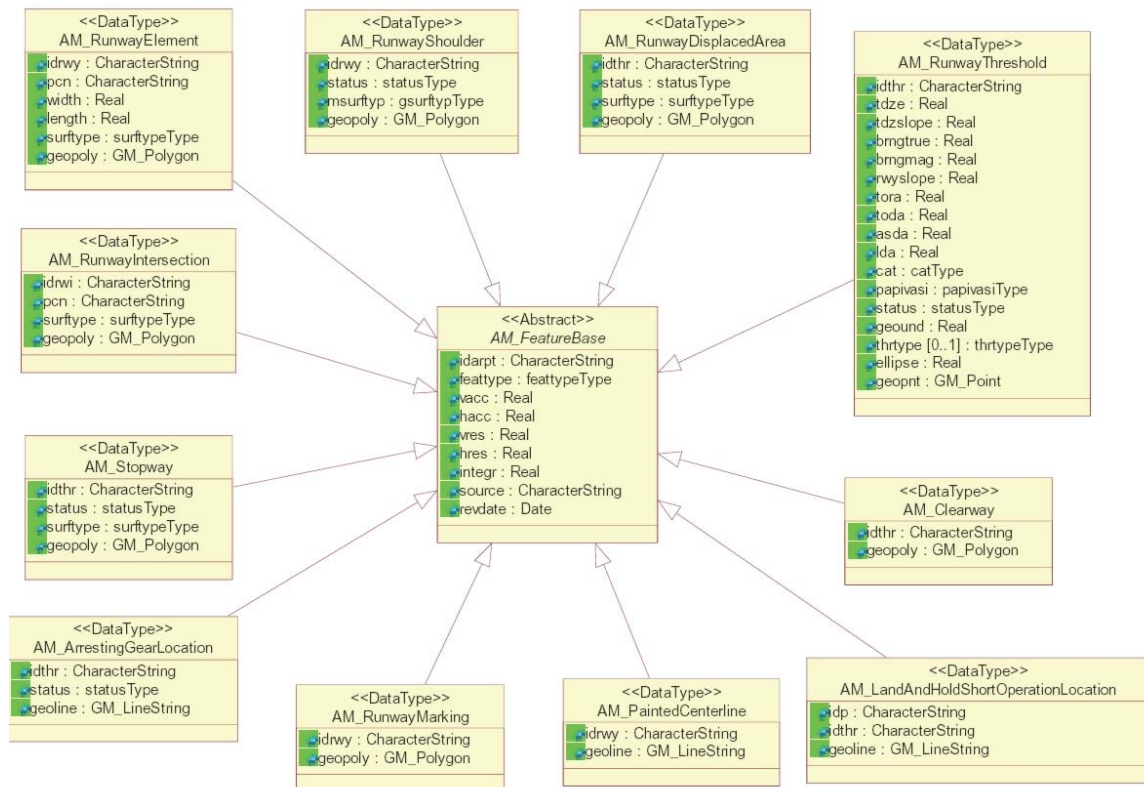
Um die Definition eines Austauschformates zu beschleunigen und zu vereinfachen, wurden bereits existierende Vorgaben aus der ISO 19100-Serie (Geographic Information) adaptiert [Do291]. Die Nutzung vorhandener Elemente aus den ISO-Standards sollte auch die Akzeptanz beim Nutzer durch Nähe zu einem ISO-Standard erhöhen. Im Rahmen des RTCA SC-193/EUROCAE WG-44 wurde beschlossen, das sich das Austauschformat auf die Beschreibung von Daten- und Informationsstrukturen beschränken solle, ohne ein physisches Austauschformat (Dateiformat) zu definieren. Lediglich für Metadaten orientiert es sich gemäß der ISO 19100-Serie eng an XML-Konventionen.

Zur Vermeidung von Datenkorruption sowie Fehlklassifizierung von Information wurden im Rahmen der Entwicklung des Datenmodells

- eindeutige Namensgebung jeder Datenklasse (Data Type) definiert.
- für die jeder Datenklasse spezifisch zugeordnete Sachinformation (Attribute) Definition von Datentypen, zulässige Wertebereiche, Kodierungen sowie Default-Values erarbeitet.

Abbildung 43 zeigt einen Ausschnitt aus dem Datenmodell für Flughafendaten mit allen Datenklassen der Oberklasse Runway. Die vereinfachte UML-Darstellung zeigt die

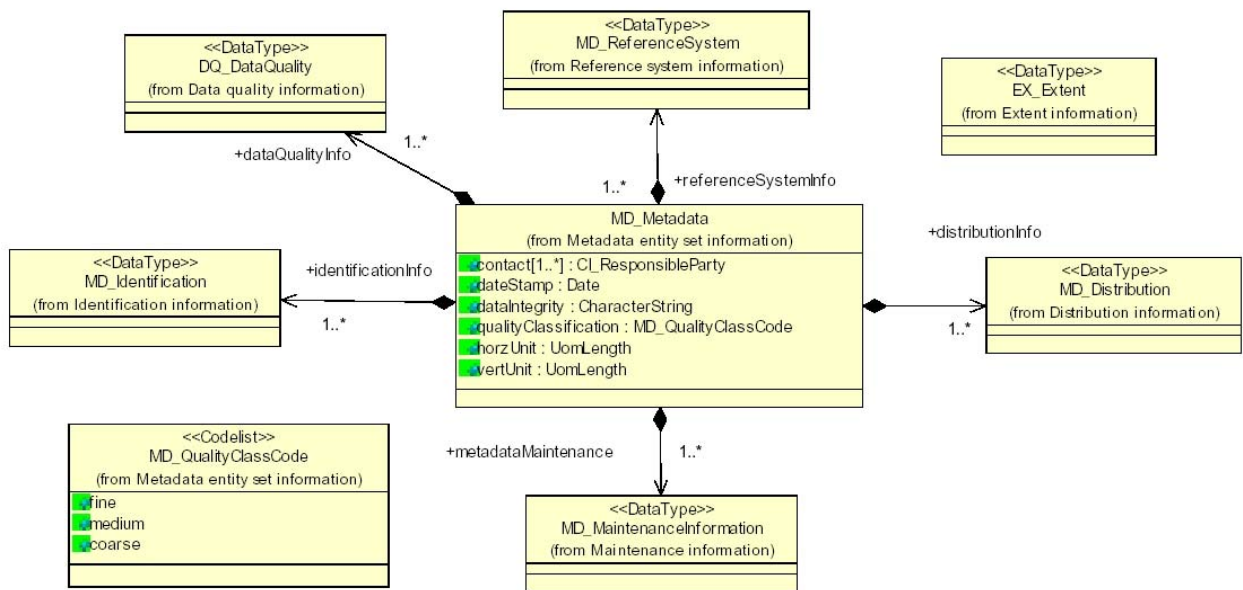
verschiedenen Datenklassen (außen) mit spezifischen Attributen sowie eine Aufliste von Attributen, die allen Datenklassen gemeinsam ist.



Quelle: [Do291]

Abbildung 43: Ausschnitt des Datenmodells für Flughafendaten (Runway-Feature Types) in einer UML-Darstellung

Die Anforderungen an Verfolgbarkeit aus RTCA Do-272a wurden basierend auf Vorgaben zur Modellierung von Metadaten für geographischen Informationssysteme der ISO 19100-Serie modelliert. Abbildung 44 zeigt die einzelnen Klassen des Metadatenmodells für Flughafendatenbanken sowie die Datentypen der Attribute:



Quelle: [Do291]

Abbildung 44: Ausschnitt des Metadatenmodells für Flughafendatenbanken in einer UML-Darstellung

Ziel der Standardisierung der Metadaten ist die Verbesserung der Integrität der Luftfahrt Datenkette, weil hierdurch z.B. automatische Abfragealgorithmen zugelassen werden.

Ein standardisiertes Austauschformat zwischen den Kettengliedern Datenaufbereitung und Anwendung explizit für Airport Moving Map Anwendungen wurde mittels ARINC 816 „*ARINC Specification 816, Embedded interchange Format for Airport Mapping Database*“ [ARINC816] geschaffen. Ziel war zum einen, die Sicherheit des Datenaustauschs zu gewährleisten (Format, Inhalt), zum anderen die kostenaufwendige Formatkonvertierung im Rahmen der Datenintegration in ein anwendungsspezifisches proprietäres Format zu umgehen und damit dem Nutzer die Möglichkeit zur Kosteneinsparung zu geben.

ARINC 816 definiert ein offenes Format für Flughafendatenbanken, um sie direkt in Cockpit anwendungen laden zu können. Es umfasst:

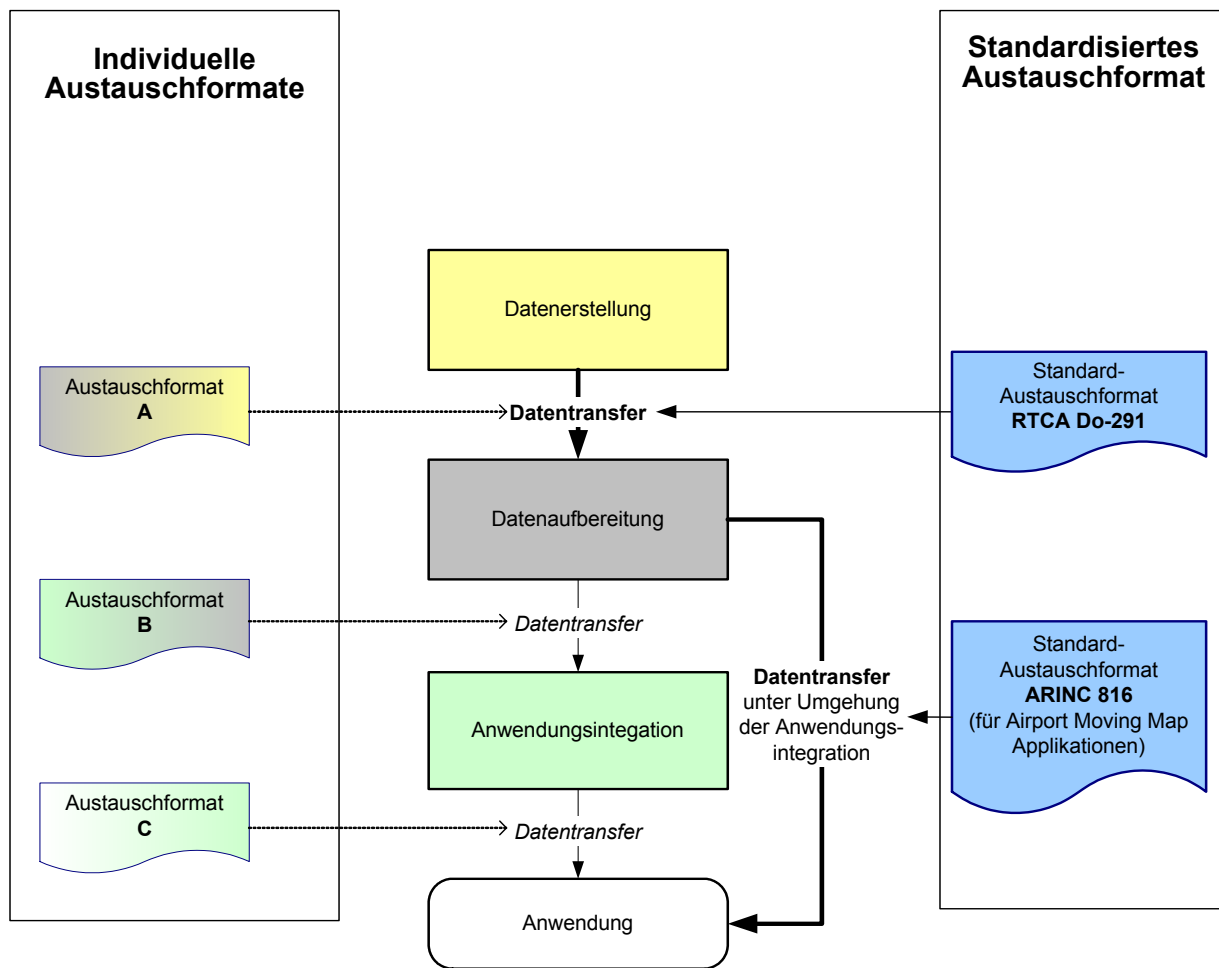
- Metadaten-Spezifikationen
- Performance-Anforderungen
- Minimale Anforderungen an Objekte und Attribute nach RTCA Do-272a
- Objektkodierung nach RTCA Do-272a
- Objektgruppierung nach RTCA Do-272a
- Triangulierung von Vektorobjekten
- Die Spezifizierung eines physischen Austauschformates
- Objekte und Attribute
- Platzierung von Objekten und Attributinformation in der Darstellung, jedoch keine Spezifizierung von Symbolen
- Algorithmen zur Objektprojektion
- Cyclic Redundancy Check (CRC) Algorithmen zum Wahren der Integrität während des Datenaustauschs

[ARINC816]

Mittels ARINC 816 wird das Kettenglied der Datenintegration überflüssig, da die Flughafendaten bereits in einem Format geliefert werden, welches von der Cockpitanwendung interpretiert und dargestellt werden kann. Dadurch werden Kosten gespart und dem Endnutzer eine größere Flexibilität und Unabhängigkeit vom Datenintegrator gewährleistet. Am Beispiel von FMS-Daten lässt sich dieser Sachverhalt erklären: Gegenwärtig werden FMS-Daten vom Datenaufbereiter im Standard-Austauschformat ARINC 424 an den Datenintegrator geliefert, welcher die Daten gegen erhebliche Kosten in ein proprietäres applikationsspezifisches Format konvertiert und der Anwendung zur Verfügung stellt.

Mittels ARINC 816 wird für Flughafendatenbanken die Konvertierung durch den Datenintegrator in ein proprietäres und applikationsspezifisches Format umgangen; die Flughafendatenbanken sollen von den Cockpitanwendungen direkt im ARINC 816-Format eingelesen werden.

Mit der Verfügbarkeit von standardisierten Austauschformaten bieten sich im Rahmen der Luftfahrt Datenkette verschiedene Wege des Datentransfers: Zum Einen kann der Datentransfer durch individuell zwischen den Kettengliedern vereinbarten Austauschformaten erfolgen (linke Seite von Abbildung 45), zum anderen kann der Datentransfer mittels den standardisierten Austauschformaten RTCA Do291 und ARINC 816 unter Umgehung der Anwendungsintegration erfolgen (rechte Seite von Abbildung 45).

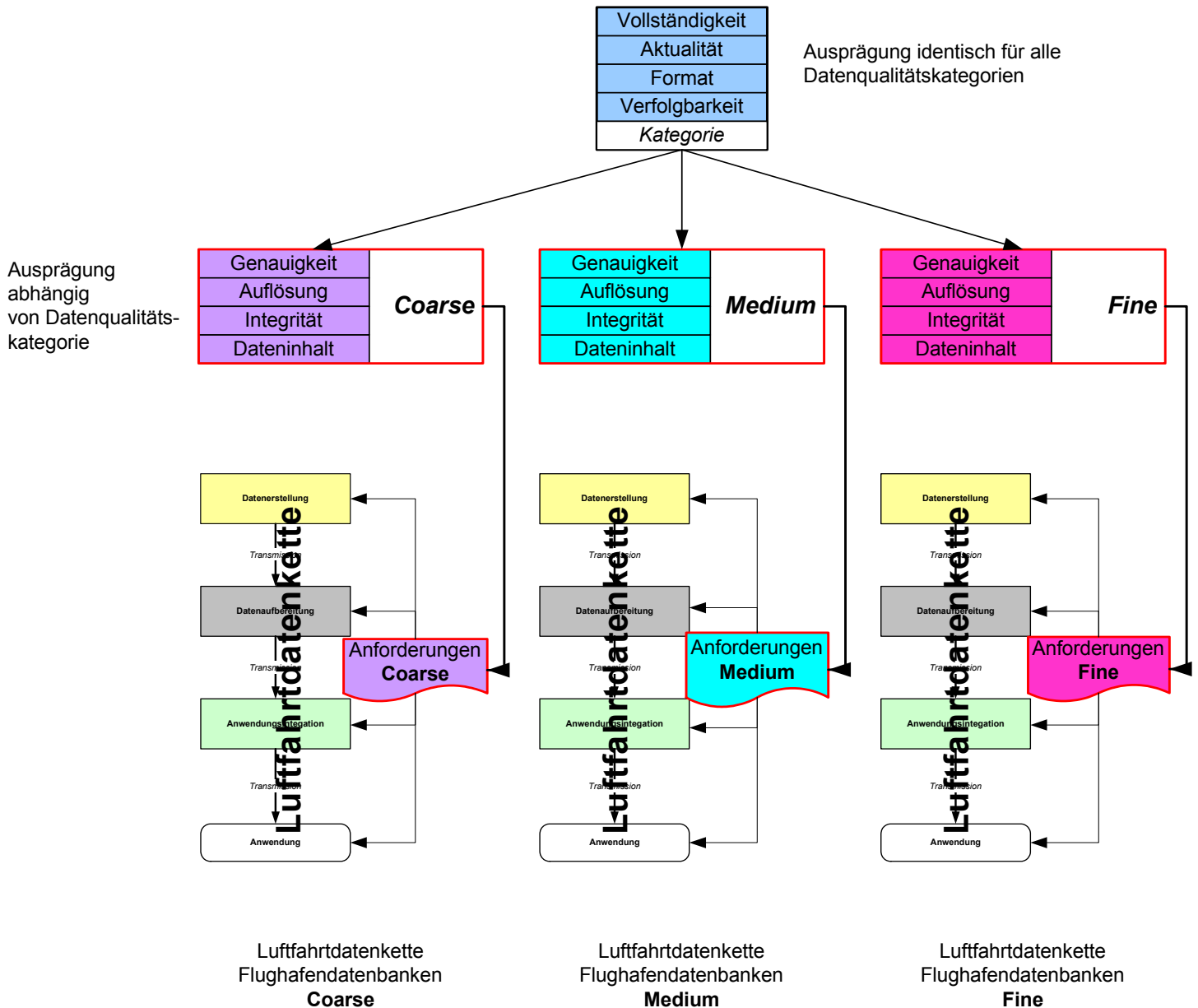


Quelle: Eigene Grafik

Abbildung 45: Datentransfer mittels standardisierten Austauschformaten oder individuellen Austauschformaten

## 7 Evaluierung von Methoden zur Datenerstellung von Flughafendatenbanken

Basierend auf den in Kapitel 6.1 bis 0 erarbeiteten drei Datenqualitätskategorien für Flughafendatenbanken *Coarse*, *Medium*, *Fine* lassen sich drei Luftfahrt Datenketten ableiten, die sich hinsichtlich der Ausprägung der Datenqualitätsparameter nach RTCA Do-272a unterscheiden:



Quelle: Eigene Grafik

Abbildung 46: Luftfahrt Datenketten für Flughafendatenbanken unterschieden nach Datenqualitätskategorie

In Abhängigkeit von der Datenqualitätskategorie unterscheiden sich hierbei die Anforderungen nach RTCA Do-272a für die Datenqualitätsparameter Genauigkeit, Auflösung, Integrität sowie dem Dateninhalt. Die Anforderungen bezüglich Vollständigkeit, Aktualität, Format und Verfolgbarkeit sind für alle drei Datenqualitätskategorien identisch (siehe Kapitel 6.1 bis 0).

Wege der Sonderrolle der Datenerstellung innerhalb der Luftfahrt Datenkette in Bezug auf die Umsetzung der definierten Datenqualitätsanforderungen (siehe Kapitel 4.5) sollen in den folgenden Kapiteln verschiedene Methoden zur Datenerstellung für Flughafendatenbanken bezüglich des Erfüllens der im Kapitel 1 erarbeiteten Datenqualitätsanforderungen evaluiert werden.

## 7.1 Eingrenzung der Untersuchungen

Um die nachfolgende Evaluierung verschiedener Methoden zur Datenerstellung in ihrem Umfang einzugrenzen, wurde sie auf folgende Bereiche eingeschränkt:

### 7.1.1 Eingrenzung der Datenqualitätskategorie

Die Anforderungen an die Datenqualitätsparameter Positionsgenauigkeit, Auflösung und Integrität sind in Abhängigkeit von der Datenqualitätskategorie unterschiedlich hoch. Um den Umfang der folgenden Untersuchungen einzuschränken, wird zunächst eine Datenqualitätskategorie definiert, für die das Einhalten der Datenqualitätsparameter durch verschiedene Erstellungsmethoden evaluiert werden soll.

Die Auswahl der Datenqualitätskategorie erfolgte anhand zweier Kriterien:

- Mit welcher Datenqualitätskategorie können die meisten Anwendungen betrieben werden?
- Welche Datenqualitätskategorie wird von den meisten gegenwärtig existierenden bzw. kurz vor der Serienreife stehenden Anwendungen genutzt? Hierdurch soll der Aktualität der Thematik und der Notwendigkeit, kurzfristige Lösungen zur Datenqualitätsfrage zu finden, Rechnung getragen werden.

Die Auswertung von Tabelle 1 sowie der in Kapitel 5.3 aufgezählten Anwendungen zeigte, dass die meisten Anwendungen Daten der Datenqualitätskategorie *Medium* nutzen (*Coarse*: 3, *Medium*: 6, *Fine*: 3). Dies gilt ebenso für die Anzahl der gegenwärtig bereits genutzten Anwendungen, von denen die meisten ebenfalls Flughafendatenbanken der Datenqualitätskategorie *Medium* benötigen (*Coarse*: 3, *Medium*: 5, *Fine*: 0):

Anwendung	Datenqualitätskategorie	Nutzungsstatus
Luftfahrtkartographie	Coarse	Wird bereits genutzt
Flugsimulation	Coarse	Wird bereits genutzt
Notfall- und Sicherheitsanwendungen	Coarse	Wird bereits genutzt
Surface Moving Map Display (SMMD)	Medium	Wird bereits genutzt (z.B. Jeppesen TPA)
Runway Awareness & Advisory Systeme	Medium	Wird bereits genutzt (z.B. Honeywell RAAS)
Rollüberwachungssysteme	Medium	Wird bereits genutzt (z.B. AMASS)



Anwendung	Datenqualitäts-kategorie	Nutzungsstatus
Rollkonflikterfassung und -Warnung	Medium	Wird bereits genutzt (z.B. AMASS)
<i>Runway Incursion</i> Erfassungs- und Vermeidungssysteme	Medium	Zukünftig
Cockpit Display of Traffic Information (CDTI)	Medium	In der Umsetzung (z.B. ACSS Saferoute)
Rollführungssysteme	Fine	Zukünftig
Systeme zur Route- und Hold Short Darstellung sowie Warnung bei Abweichungen	Fine	Zukünftig
Advanced Surface Movement Guidance Systems Level 3 & 4	Fine	Zukünftig

Quelle: [Youn2004] , [Do-272a], [Hon2004]

Tabelle 5: Anforderung verschiedener Anwendungen an Datenqualitätskategorien von Flughafendatenbanken und gegenwärtiger Nutzungsstand der Anwendung

Entsprechend der Auswertung werden bei der weiteren Analyse ausschließlich die Datenqualitätsparameter der Kategorie „Medium“ berücksichtigt.

### 7.1.2 Eingrenzung der Datenqualitätsparameter

Wie in Kapitel 4.5 beschrieben, nimmt die Datenerstellung in Bezug auf die Umsetzung der definierten Anforderungen eine Sonderrolle innerhalb der Luftfahrtdatenkette ein. Zusätzlich zur Umsetzung der Datenqualitätsparameter Format, Integrität, Aktualität und Verfolgbarkeit, welche alle Kettenglieder betrifft, liegt bei der Datenerstellung auch der Schwerpunkt der Verantwortung für die Umsetzung der Anforderungen an Genauigkeit, Vollständigkeit, und Auflösung sowie für die Gewährleistung des benötigten Dateninhaltes.

Der Datenerstellungsprozess lässt sich im allgemeinen in zwei Teile aufgliedern:

1. Das Generieren/Aufbereiten einer Datenbasis als Grundlage zur Objektextraktion
2. Das Extrahieren von Flughafendatenbankobjekten aus der Datenbasis.

#### Ausschlusskriterien für Datenqualitätsparameter

**Aktualität:** Die Aktualität der Datenbasis ist sowohl für die Datenerstellung, und hierbei insbesondere für das Generieren/Aufbereiten der Datenbasis wichtig, aber auch für den auf die Datenerstellung folgenden Datenrevisionsprozess im Fall von Änderungen. Letzteres wird später im Rahmen der späteren Evaluierung von Methoden und Daten zum Aktualisieren von Flughafendatenbanken betrachtet (siehe Kapitel 1). Die Aktualität der Datenbasis zum Erstellen von Flughafendatenbanken wird in den folgenden Untersuchungen zur Evaluierung von Datenerstellungsmethoden im Rahmen der Untersuchungen zur Verfügbarkeit implizit angesprochen.

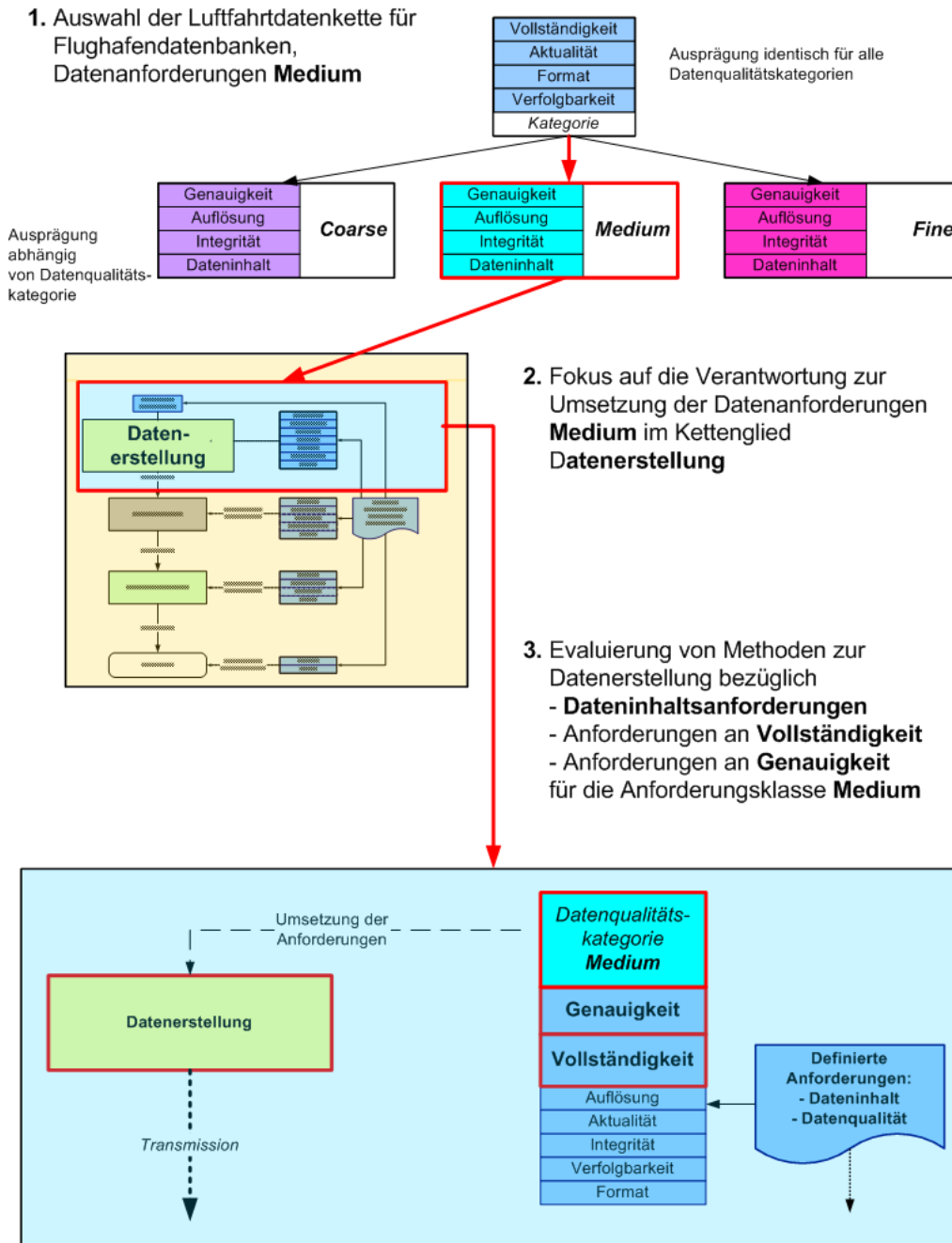
**Verfolgbarkeit und Format:** Die Umsetzung der Datenqualitätsparameter Verfolgbarkeit und Format muss erst bei der Extrahierung der verschiedenen Flughafendatenbank-Objektklassen aus einer Datenquelle sichergestellt werden. Der vorgelagerte Prozess des Generierens/Aufbereitens der Datenbasis ist hiervon nicht betroffen. Die Umsetzung der Anforderungen kann unabhängig von der gewählten Datenerstellungsmethode durch entsprechende Anpassung des Datenverarbeitungsprozesses während der Datenerstellung gewährleistet werden und ist daher nicht methodenspezifisch. Die Gewährleistung der Anforderungen an die Datenqualitätsparameter Verfolgbarkeit und Format durch die verschiedenen Methoden zur Datenerstellung wird daher im weiteren nicht untersucht.

**Auflösung und Integrität:** Die Datenqualitätsparameter Auflösung und Integrität sind zwar methodenspezifisch, da auch bereits das Generieren einer Datenbasis mehrere Prozesse umfasst, bei der eine Datenkorruption zu Verschlechterung der Datenqualitätsparameter Positionsgenauigkeit und Vollständigkeit bei den extrahierten Flughafendatenbankobjekten führen kann. Durch eine Evaluierung der Datenqualitätsparameter Positionsgenauigkeit und Vollständigkeit für eine methodenspezifische Datenbasis wird jedoch die Auflösung und Integrität des vorgelagerten Datenerstellungsprozesses bereits mit berücksichtigt und mitevaluiert. Die Gewährleistung der Anforderungen an die Datenqualitätsparameter Auflösung und Integrität durch die verschiedenen Methoden zur Datenerstellung wird daher im weiteren nicht explizit untersucht.

**Vollständigkeit und Genauigkeit:** Die Datenqualitätsparameter Vollständigkeit und Genauigkeit sind datenerstellungsmethodenabhängig. Je nach Genauigkeit und Detaillreichtum der Datenbasis kann die erforderliche Genauigkeit und Vollständigkeit für das Erstellen einer Flughafendatenbank erfüllt werden.

Die Evaluierung der verschiedenen Methoden zur Datenerstellung beschränkt sich daher auf die verbleibenden Datenqualitätsparameter Vollständigkeit und Genauigkeit.

Abbildung 47 zeigt die Einschränkung der folgenden Evaluierung ausgehend von den in Abbildung 46 dargestellten drei Datenqualitätskategorien für Luftfahrt Datenketten zum Erstellen von Flughafendatenbanken nach RTCA Do-272a:



Quelle: Eigene Grafik

Abbildung 47: Einschränkungen der Evaluierung

Da sich alle in Tabelle 5 aufgeführten Anwendungen, welche die Daten der Qualitätskategorie Medium benötigen, auf die Nutzung der horizontalen Datenkomponente beschränken (2-dimensional projizierte Darstellung), wird sich bei der Evaluierung des Datenqualitätsparameters Positionsgenauigkeit ausschließlich auf die horizontale Lagekomponente konzentriert.

Die Datenerstellungsmethoden werden im folgenden zunächst bzgl. der Gewährleistung der Vollständigkeit und Genauigkeit für die die räumliche Ausprägung beschreibenden Vektorgeometrie der Flughafenobjekte untersucht. Eine Untersuchung zur Gewährleistung der Genauigkeit der beschreibenden Zusatzdaten (Attribute) jeder Objektklasse wird in diesem Rahmen nicht durchgeführt und bleibt weitergehenden Untersuchungen vorbehalten.

Unter Berücksichtigung der oben definierten Einschränkungen ergeben sich folgende, aus RTCA Do-272a / EUROCAE ED-99 abgeleitete Dateninhalts- und

Datenqualitätsanforderungen, welche zum Evaluieren der Datenerstellungsmethoden bzgl. des Erstellens von Vektorobjekten für Flughafendatenbanken genutzt werden sollen:

Benötigte Dateninhalte zum Gewährleisten der Vollständigkeit	Horizontale Positionsgenauigkeit (CE90)
Runway Element	5
Runway Intersection	5
Runway Threshold	5
Painted Centerline	NS
LAHSO	5
Arrest Gear Location	5
Runway Shoulder	5
Stopway	5
Runway Displaced Area	5
Runway Marking	NS
FATO	5
TLOF	5
Helipad Threshold	5
Taxiway Element	5
Taxiway Shoulder	5
Taxiway Guidance Line	NS
Taxiway intersection marking	NS
Taxiway holding position	5
Runway Exit line	NS
Frequency area	NS
Apron	5
Stand guidance line	NS
Parking stand location	5
Parking stand area	5
Deicing area	5
Vertical polygonal objects	5
Vertical point objects	5
Vertical line objects	5
Construction area	5
Aerodrome reference point	30
Aerodrome boundary	NS
Service Road	5

Quelle: [Do-272a]

Tabelle 6: Inhalts- und horizontale Positionsgenauigkeitsanforderungen für Datenqualitätskategorie *Medium* nach Do-272a (NS = keine Anforderungen spezifiziert)

## 7.2 Vorgehensweise

Im Rahmen der Evaluierung werden verschiedene gängige Datenerstellungsmethoden hinsichtlich ihrer Eignung zum Erfüllen der im Rahmen von Kapitel 7.1 definierten Datenqualitätsparameter untersucht.

Bzgl. der Datenerstellung lassen sich zwei Gruppen von Verfahren unterscheiden:

1. Verfahren der Primärdatenerzeugung: Verfahren zur direkten oder indirekten Einmessung der Vektorgeometrie räumlicher Objekte.
2. Verfahren der Sekundärdatenerzeugung: Ableitung der Vektorgeometrie räumlicher Objekte aus aufbereiteten räumlichen Daten anderer Anwendungsbereiche (z.B. aus Karten der Flughafenverwaltung)

Als Verfahren der Primärdatenerzeugung lassen sich wiederum zwei Gruppen von Vermessungsverfahren unterscheiden:

1. Verfahren der Fernerkundung:  
Verfahren der Fernerkundung nutzen die kontaktlose Messung der Variation von Energiefeldern (Druckfelder, Schwerfelder, elektrostatische Felder, elektromagnetische Felder) mittels spezieller Fernerkundungssensoren. Hierzu gehören chemo-optische, elektro-optische, Radar- sowie Laserscanning-Verfahren.
2. Bodengestützte Vermessungsverfahren:  
Bodengestützte Vermessungsverfahren messen Lagepunkte durch direkten Kontakt zum Objekt ein. In die Gruppe der bodengestützten Vermessungsverfahren fallen Verfahren der Winkel- und Entfernungsmessung, wie z.B. Tachymetrie, als auch satellitengestützte Verfahren, wie z.B. GPS.

Zur Evaluierung der Flughafendatenbankgenerierung durch Sekundärdaten sollen Produkte der aeronautischen Kartenerstellung im Rahmen der national AIPs sowie Karten und räumliche Datenbanken, welche zum Verwalten von Flughafeninfrastruktur durch die Flughafenbetreiber genutzt werden, untersucht werden. Amtliche geodätische Kartenprodukte (topographische Kartenwerke) werden wegen des fehlenden inhaltlichen Bezuges (benötigte Flughafenobjekte werden nur teilweise abgebildet) nicht berücksichtigt.

Im Rahmen der Evaluierung werden die verschiedenen Erstellungsverfahren auf folgende Faktoren hin analysiert:

### 1. Vollständigkeit:

Die Evaluierung von Datenerstellungsverfahren bezüglich des Datenqualitätsparameters Vollständigkeit erfolgt bzgl. der in Tabelle 6 definierten Dateninhaltsanforderungen. Vollständigkeit gilt dann als gewährleistet, wenn mit dem analysierten Datenerstellungsverfahren alle definierten Dateninhalte erstellt werden können. Das Gewährleisten der Vollständigkeit wird ausschliesslich für die räumlichen Vektorobjekte untersucht. Um den Umfang der Arbeit einzuschränken wurde keine Untersuchung der erreichbaren Vollständigkeit der beschreibenden Zusatzdaten (Attribute) durch das jeweilige Datenerstellungsverfahren vorgenommen. Letzteres bleibt einer zukünftigen Arbeit vorbehalten.

Zur Evaluierung der Vollständigkeit wird sich inhaltlich auf die räumlichen Elemente von Flughafendatenbanken der Datenqualitätskategorie Medium nach Do-272a beschränkt, wie in Appendix A aufgelistet. In diesem Rahmen sollen lediglich die Elemente, welche eine real existierende, visuell zu identifizierende räumliche Ausprägung besitzen, betrachtet werden. Die virtuellen Elemente Frequency Area und Aerodrome Reference Point werden in der Evaluierung nicht berücksichtigt.

2. Genauigkeit:

Zur Evaluierung des Datenerstellungsverfahrens bezüglich des Datenqualitätsparameters Genauigkeit wird der Positionsfehler beim Erstellen von räumlichen Datenelementen mittels der verschiedenen Datenerstellungsmethoden analysiert. Durch Vergleich mit den Anforderungen aus Tabelle 6 wird das Erfüllen der Genauigkeitsanforderung durch das jeweilige Datenerstellungsverfahren evaluiert. Das Gewährleisten der Genauigkeit wird lediglich für die räumlichen Vektorobjekte untersucht. Um den Umfang der Arbeit einzuschränken wurde keine Untersuchung der erreichbaren Genauigkeit der beschreibenden Zusatzdaten (Attribute) durch das jeweilige Datenerstellungsverfahren vorgenommen. Letzteres bleibt einer zukünftigen Arbeit vorbehalten.

3. Verfügbarkeit des Erstellungsverfahrens:

Als eine Erweiterung der Evaluierung der Vollständigkeit erfolgt die Evaluierung der Verfügbarkeit des Erstellungsverfahrens, die sich auf orts- oder wetterabhängige Einschränkungen der Nutzbarkeit eines Verfahrens sowie allgemeine und spezifische Einschränkungen eines Verfahrens bezieht.

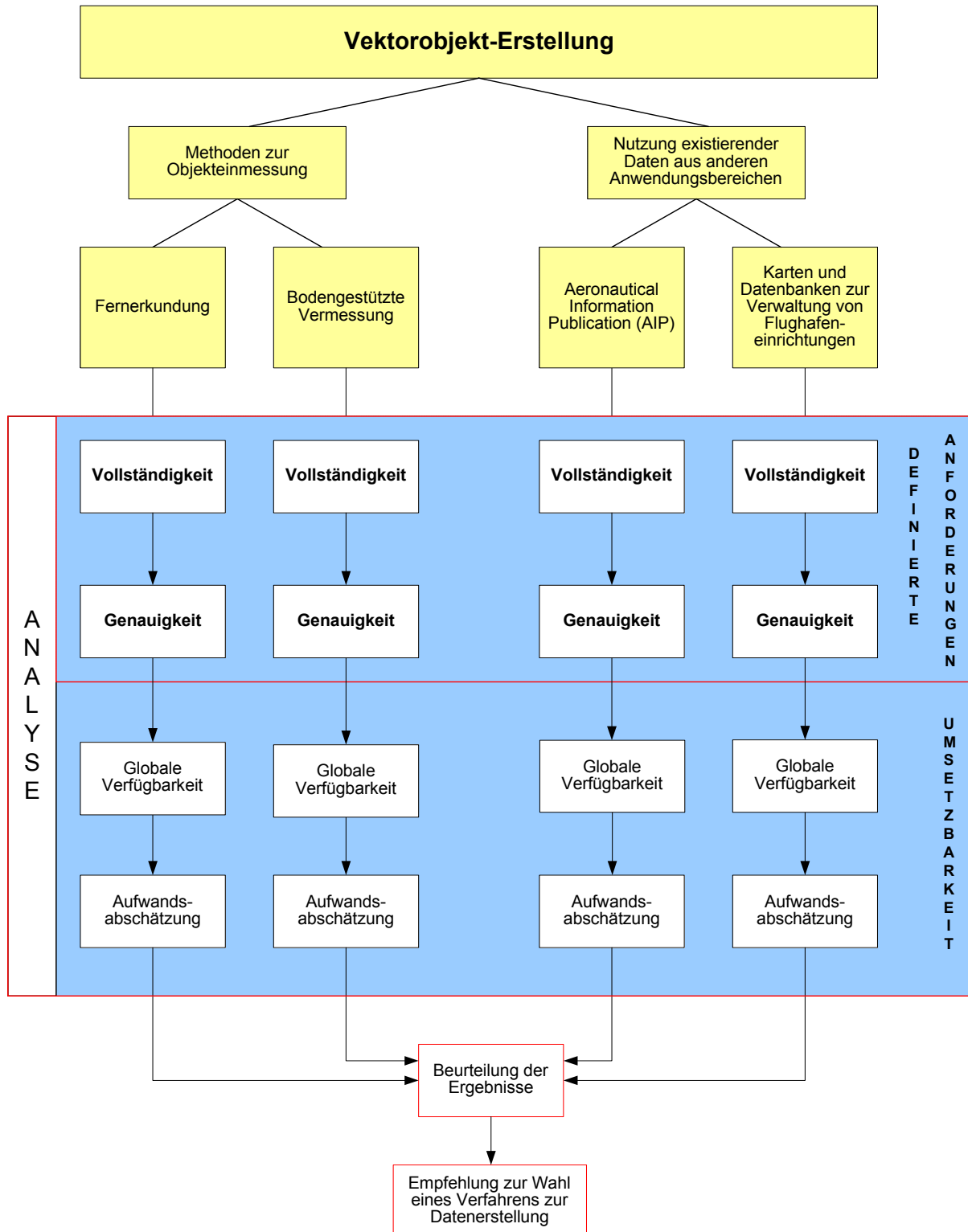
4. Aufwandsabschätzung:

Die Aufwandsabschätzung mittels des gewählten Verfahrens bezieht sich auf die Erstellung der Vektorobjekte einer Flughafendatenbank nach RTCA Do-272a für einen Flughafen mittlerer Größenordnung (z.B. Reno, Nevada). Untersuchungen am FSR haben gezeigt, dass zur Erstellung einer Flughafendatenbank für einen Flughafen mittlerer Größenordnung ca. 1500 Objekte entsprechend 12.000 – 15.000 Einzelpunkten eingemessen werden müssen.

Bei der Aufwandsabschätzung für das Erstellen der Vektorobjekte werden sowohl Kosten für den Datenerwerb bzw. für die Datenerstellung und Prozessierung als auch operationelle Faktoren (z.B. Verzögerungen bei der Anwendung des Verfahrens im Flughafenumfeld wegen Eingriff in das operationelle Geschehen am Flughafen, Sicherheitsbelange) berücksichtigt.

Der zum Erstellen der beschreibenden Information (Attribute) notwendige Aufwand wird im Rahmen der Aufwandsabschätzung nicht berücksichtigt. Er wird je nach gewähltem Verfahren jedoch verschieden hoch sein und kann dadurch den Gesamtaufwand zum Erstellen einer Flughafendatenbank nach RTCA Do-272a beeinflussen. Das Bestimmen des Gesamtaufwandes unter Berücksichtigung des Aufwandes zum Erstellen der beschreibenden Information bleibt weitergehenden Untersuchungen vorbehalten.

Abschließend erfolgt eine Beurteilung der einzelnen Verfahren in Hinblick auf die untersuchten Faktoren sowie eine Empfehlung eines geeigneten Verfahrens zum Erstellen von Flughafendatenbanken.



Quelle: Eigene Grafik

Abbildung 48: Vorgehensweise zur Evaluierung von Methoden zur Datenerstellung von Flughafendatenbanken

### 7.3 Grundlagen

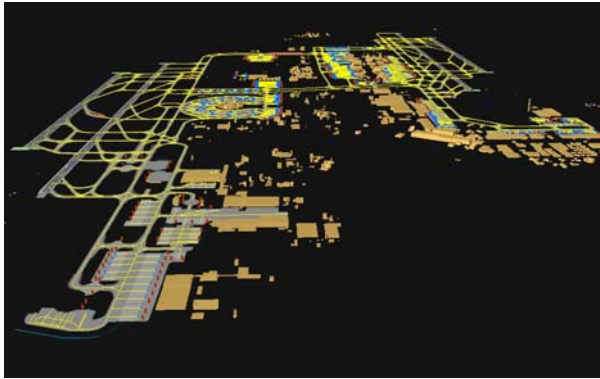
Die Analyse stützt sich auf Ergebnisse der Erstellung, Verifizierung und Aktualisierung von folgenden Flughafendatenbanken, welche der Autor im Rahmen seiner Tätigkeit am FSR mittels verschiedener Verfahren durchgeführt hat:

Flughafen	Erstellungsverfahren	Verifizierungsverfahren	Aktualisierungsverfahren
<b>Stuttgart</b>	Fernerkundung	Bodengestützte Vermessung	-
<b>Hamburg</b>	Fernerkundung	-	-
<b>Augsburg</b>	Fernerkundung	-	-
<b>Frankfurt</b>	Fernerkundung GPS-Vermessung	GPS-Vermessung Datenbanken des Flughafenbetreibers	Fernerkundung GPS-Vermessung
<b>Manching</b>	Fernerkundung	-	-
<b>Amsterdam</b>	-	GPS-Vermessung	
<b>Toulouse</b>	Fernerkundung GPS-Vermessung	GPS-Vermessung	Fernerkundung
<b>Bordeaux</b>	Fernerkundung	-	-
<b>Nizza</b>	Fernerkundung	-	-
<b>Paris CDG</b>	Fernerkundung	-	Fernerkundung AIP
<b>Innsbruck</b>	AIP	-	-
<b>Juneau</b>	Fernerkundung GPS-Vermessung	GPS-Vermessung	GPS-Vermessung
<b>Reno</b>	Fernerkundung GPS-Vermessung	GPS-Vermessung	Fernerkundung
<b>Abbotsford</b>	-	GPS-Vermessung	-
<b>Seattle Boeing Field</b>	-	GPS-Vermessung	-
<b>Moses Lake</b>	-	GPS-Vermessung	-
<b>Everett</b>	-	GPS-Vermessung	-
<b>Renton</b>	-	GPS-Vermessung	-
<b>Seattle Tacoma</b>	-	GPS-Vermessung	-
<b>Quito</b>	Fernerkundung	-	-
<b>Addis Abeba</b>	Fernerkundung		
<b>Yaounde</b>		GPS-Vermessung	

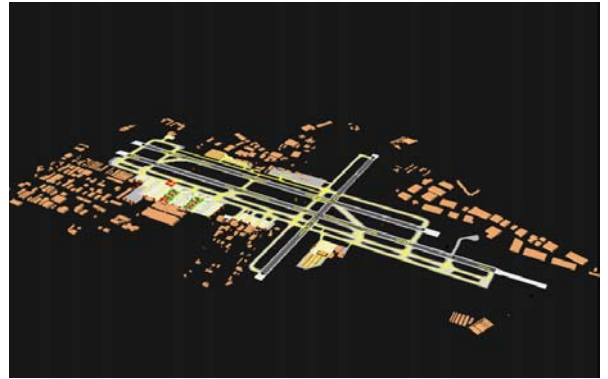
Tabelle 7: Vom Autor erstellte, verifizierte und aktualisierte Flughafendatenbanken



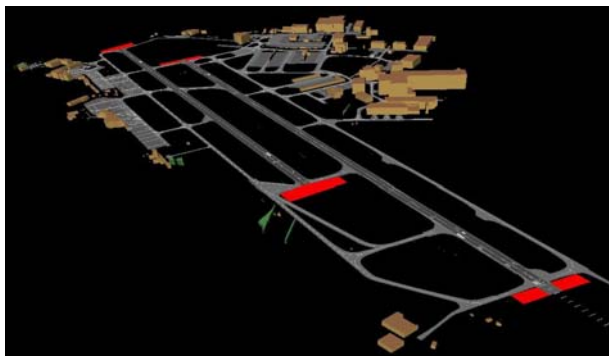
Tabelle 8 zeigt eine Auswahl der vom Autor erstellten Flughafendatenbanken:



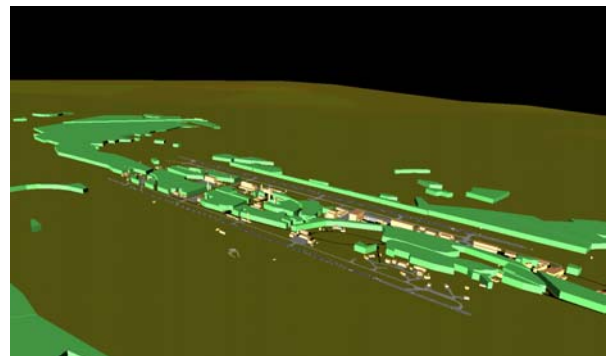
Paris CDG



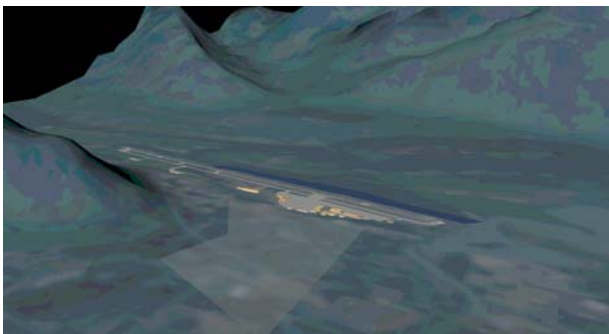
Reno, NV



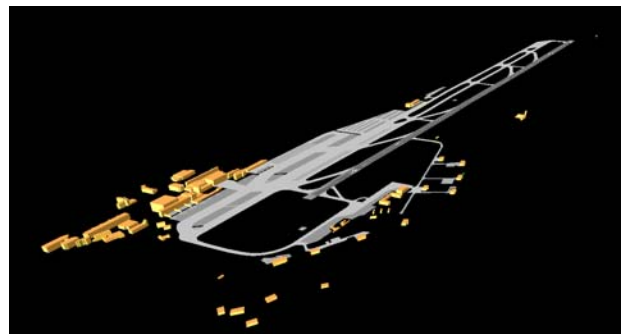
Toulouse



Manching



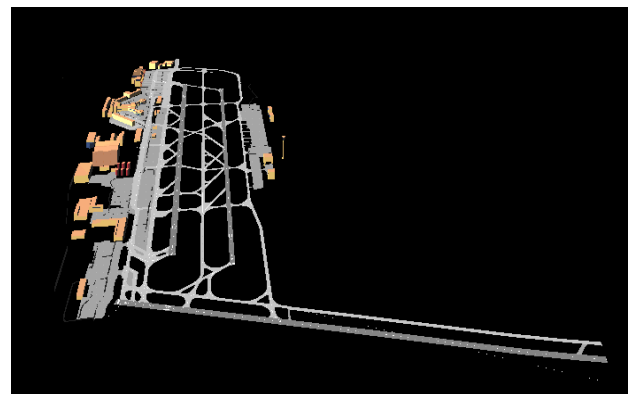
Juneau, AK



Stuttgart



Hamburg



Frankfurt Main

Quelle: Eigene Grafiken / FSR

Tabelle 8: Darstellung einer Auswahl an vom Autor erstellten Flughafendatenbanken



## 8 Evaluierung von Datenerstellungsmethoden: Fernerkundung

### 8.1 Einführung in die Fernerkundung

*„Remote sensing is the practice of deriving information about the earth's land and water surface using images acquired from an overhead perspective, using electromagnetic radiation in one or more regions of the electromagnetic spectrum, reflected or emitted from the earth's surface.“ [Cam1996]*

Die Geschichte der Fernerkundung beginnt mit der Erfindung der Photographie. Erste Versuche, die Oberfläche der Erde aus einem Fesselballon zu photographieren, stammen aus dem Jahr 1858. In der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts wurde die Technik des Photographierens stark verbessert, und mit der Erfindung des motorgetriebenen Flugzeuges stand erstmals eine leistungsfähige Fernerkundungsplattform zur Verfügung. Die ersten Luftbilder aus einem Flugzeug entstanden 1910 in Italien aus einem von Wilbur Wright gesteuerten Flugzeug. Die militärischen Vorteile der Fernerkundung brachten einen raschen Entwicklungsschub vor und nach dem ersten Weltkrieg; die Photogrammetrie etablierte sich als eigenständige Wissenschaft. Im zweiten Weltkrieg wurden die Methoden der Fernerkundung weiterentwickelt; es wurde nun nicht mehr nur sichtbares Licht photographisch aufgezeichnet, sondern auch der Infrarot- und Mikrowellenbereich. Mit der Indienstnahme des ersten meteorologischen Satelliten (TIROS-1) 1960 und dem Start des LANDSAT-1, dem ersten reinen Erderkundungssatelliten, fiel erstmals der Begriff *Fernerkundung* [Cam1996].

Ein Fernerkundungssystem besteht aus vier Komponenten:

- Strahlungsquelle
- Strahlungsweg
- Objekt
- Sensor

Passive Systeme nutzen die extraterrestrische Strahlung der Sonne als Strahlungsquelle. Die Sensoren messen den Anteil des von Objekten auf der Erdoberfläche reflektierten Sonnenlichtes bzw. die durch Aufheizung der Oberfläche in Folge der Einstrahlung emittierte elektromagnetische Strahlung. Elektromagnetische Strahlung wird bei ihrem Weg durch die Atmosphäre teilweise absorbiert, reflektiert und gestreut. Die Streueffekte auf dem Weg von der Erdoberfläche zum Sensor schwächen den Informationsgehalt, da sie keine spektralen oder räumlichen Modulationen des Objektes auf der Erde beinhalten [Kap1994]. Passive Systeme sind daher den Störeinflüssen der Atmosphäre voll ausgesetzt.

Aktive Systeme (Radar- bzw. Mikrowellensysteme) erzeugen eigene elektromagnetische Strahlung. Von der künstlichen Strahlungsquelle ausgesendet, erreicht die Strahlung ein Objekt und wird von diesem absorbiert oder reflektiert. Der reflektierte Anteil wird vom Sensor aufgezeichnet. Im Gegensatz zu passiven Systemen sind aktive Sensoren weitgehend unabhängig von Störeinflüssen der Atmosphäre.

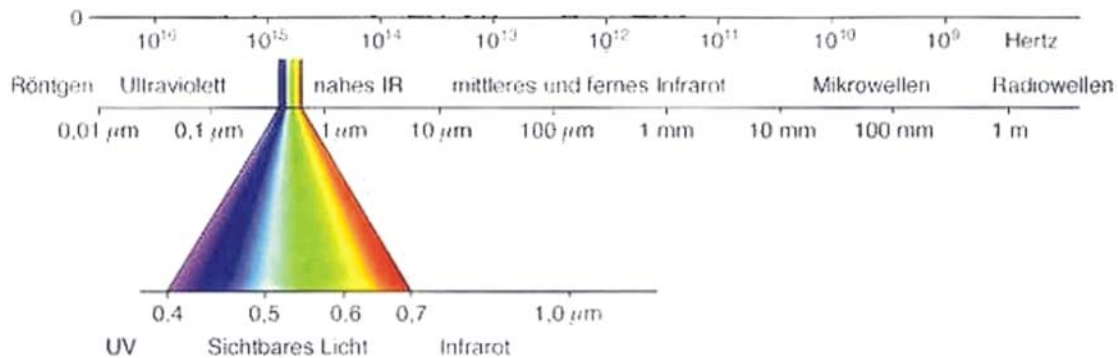
#### 8.1.1 Parameter zum Beschreiben der Leistung von Fernerkundungssensoren

Die Leistungsfähigkeit eines Fernerkundungssystems wird definiert durch seine spektrale, radiometrische, räumliche und temporale Auflösung sowie seine geometrischen Eigenschaften:

### Spektrale Auflösung

Die spektrale Auflösung definiert den Wellenlängenbereich, in dem der Sensor elektromagnetische Strahlung aufzeichnen kann [Pas2000].

Das elektromagnetische Spektrum erstreckt sich von kosmischen Strahlen mit  $10^{-7} \mu\text{m}$  Wellenlänge bis zu Fernseh- und Radiowellen mit  $10^8 \mu\text{m}$  Wellenlänge.



Quelle: [Lil1994], modifiziert

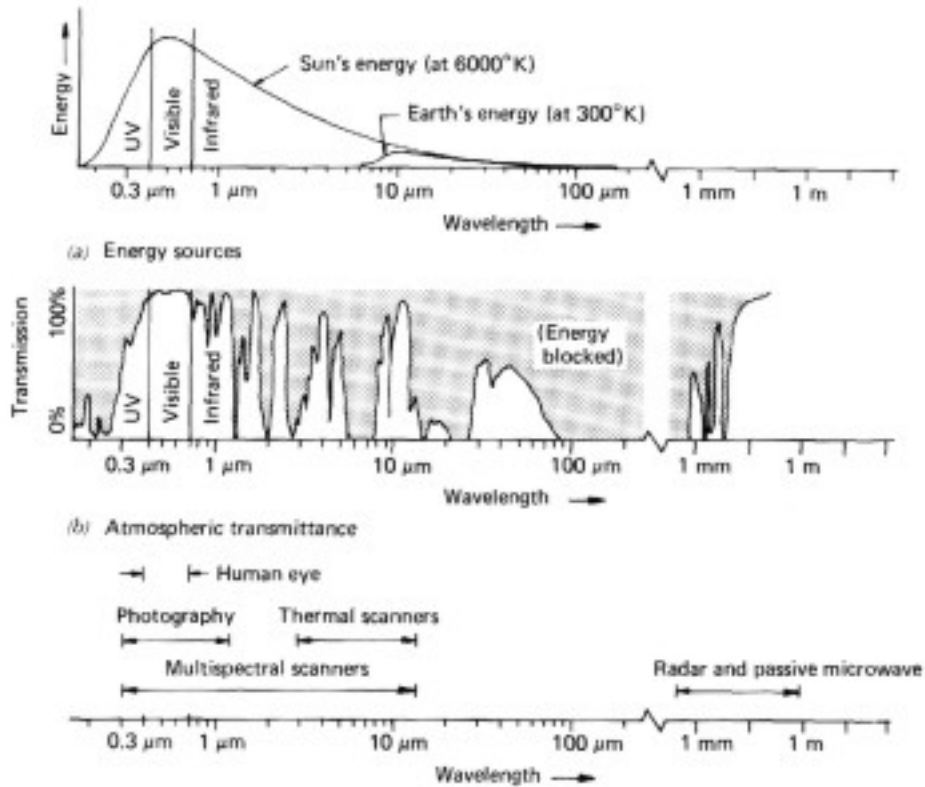
Abbildung 49. Elektromagnetisches Spektrum

Das insbesondere für passive Fernerkundungssensoren bedeutende solare Spektrum lässt sich in fünf Bänder aufteilen:

- <b>UV-Strahlung:</b>	0,3	-	0,38 $\mu\text{m}$
- <b>Sichtbare Strahlung:</b>	0,38	-	0,72 $\mu\text{m}$
<i>blaues Licht:</i>	0,4	-	0,50 $\mu\text{m}$
<i>grünes Licht:</i>	0,5	-	0,60 $\mu\text{m}$
<i>rotes Licht:</i>	0,6	-	0,70 $\mu\text{m}$
- <b>Nahes Infrarot:</b>	0,72	-	1,30 $\mu\text{m}$
- <b>Mittleres Infrarot:</b>	1,30	-	3,00 $\mu\text{m}$
- <b>Thermisches (fernes) Infrarot:</b>	3,00	-	14,0 $\mu\text{m}$

Die solare Strahlungskurve beschreibt die von der Sonne emittierte Energie in Bezug zur Wellenlänge der Strahlung. Am Außenrand der Atmosphäre beginnt die solare Strahlungskurve bei etwa  $0,3\mu\text{m}$ , erreicht ihr Energiemaximum bei  $0,5 \mu\text{m}$  und fällt dann bis  $14 \mu\text{m}$  ab [Kap1994]. Durch Absorption, Reflexion und Streuung ist die solare Strahlungskurve am Boden deutlich gegenüber der solaren Strahlungskurve am Außenrand der Atmosphäre verändert und der Energiegehalt vermindert.

Abbildung 50 zeigt die solare Kurve am Außenrand der Atmosphäre (oben) und am Erdboden (Mitte) sowie die Abhängigkeit der atmosphärischen Absorption von der von Wellenlänge:



Quelle: [Lil1994]

Abbildung 50: Solare Strahlungskurve am Außenrand der Atmosphäre (oben) und am Erdboden (Mitte)

Im unteren Teil von Abbildung 50 ist die spektrale Charakteristik einiger Fernerkundungssensoren aufgeführt. Passive Sensoren arbeiten im Bereich des sichtbaren Lichtes und nahem Infrarot. Das menschliche Auge ist sensibel für den Wellenlängenbereich zwischen 0,38 - 0,72 µm und unterscheidet in diesem Bereich blaues, grünes und rotes Licht. Chemo-optische photographische Sensoren sind für ein wesentlich größeres Wellenlängenspektrum sensibel als das menschliche Auge. Elektro-optisch multispektrale Sensoren können ein sehr großes Wellenlängenspektrum aufzeichnen, welches das sichtbare Licht umfasst, aber auch weit in den Infrarotbereich hineinragt. Thermale Sensoren arbeiten im Bereich des thermischen Infrarots.

Aktive Sensoren, wie z.B. Radar sind nur für einen vergleichbar schmalen Spektralbereich sensibel, da ausschließlich Reflektionen mit der Wellenlänge der eigenen Strahlungsquelle aufgezeichnet werden, um Verfälschungen durch Überlagerung mit Reflektionen anderer natürlicher Strahlungsquellen zu vermeiden.

In Bezug auf die spektralen Eigenschaften des Sensors lassen sich drei Formen der Fernerkundung unterscheiden:

1. Die einfachste Form der Fernerkundung ist die Aufzeichnung des durch die Erdoberfläche reflektierte Anteils des Sonnenlichts. Hierbei werden in der Regel Wellenlängen des sichtbaren Bereiches und des nahen Infrarots aufgezeichnet. Die Ergebnisse entsprechen am ehesten dem Sehempfinden des menschlichen Auges.
2. Eine zweite Form der Fernerkundung zeichnet die von der Erdoberfläche emittierte Strahlung auf. Weil die von der Erdoberfläche emittierte Strahlung im fernen Infrarot am stärksten ist, braucht man zur Aufzeichnung dieser Wellenlänge spezielle Instrumente.

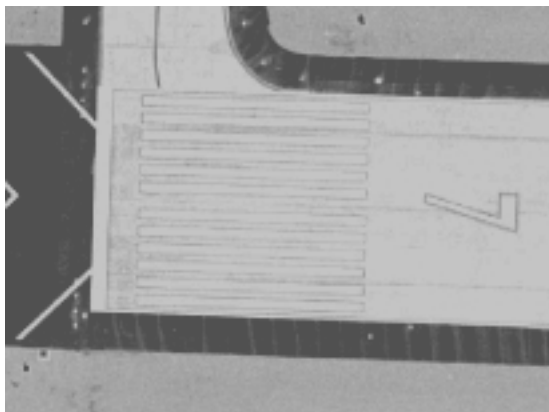
3. Die dritte Form der Fernerkundung umschließt die Klasse der aktiven Fernerkundungssensoren, die über eine künstliche Strahlungsquelle verfügen und die Reflexion dieser Strahlung von der Erdoberfläche messen.

[Cam1996]

### Radiometrische Auflösung

Die radiometrische Auflösung eines Fernerkundungssensors beschreibt dessen Vermögen, innerhalb seiner spektralen Auflösung verschiedene Reflektionsintensitäten zu unterscheiden und aufzeichnen zu können [Pas2000].

Abbildung 51 verdeutlicht den Unterschied zwischen geringer und hoher radiometrischer Auflösung. Das linke Bild wurde mit einer Auflösung von 2048 Intensitätsstufen, das rechte mit 256 Intensitätsstufen aufgezeichnet. Die Landebahnmarkierung, welche im linken Bild noch deutlich zu identifizieren ist, hebt sich im rechten Bild nur noch schwach vom Untergrund ab.



11-bit (2048 Farbstufen) radiometrische Auflösung



8-bit (256 Farbstufen) radiometrische Auflösung

Quelle: Eigene Grafik

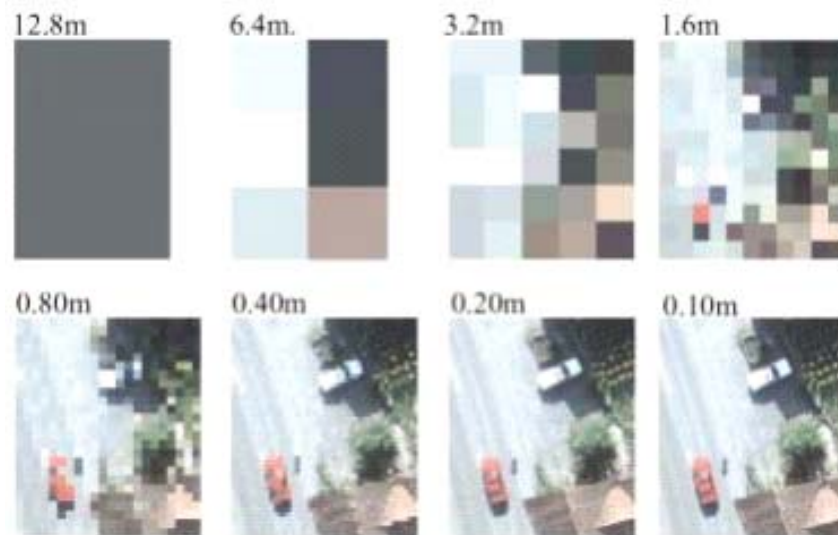
Abbildung 51: Informationsgehalt bei verschiedener radiometrischer Auflösung

Ausreichende radiometrische Auflösung ist insbesondere unter schlechten Beleuchtungsverhältnissen (reduzierte Signalintensität und spektrale Variation) entscheidend für das korrekte Identifizieren und Einmessen von Objekten.

### Räumliche Auflösung

Die Größe der kleinsten aufzuzeichnenden und zu unterscheidenden Objekte beschreibt das räumliche Detailreichtum der Abbildung und damit die räumliche Auflösung [Pas2000]. Jeder Fernerkundungssensor ist bezüglich dieser Fläche der kleinsten unterscheidbaren räumlichen Objekte limitiert.

Reflektierte Strahlung wird bei elektro-optischen Systemen durch eine Matrix von einzelnen Halbleitern aufgezeichnet, so genannten Charged Coupled Devices, (CCDs). Jedes CCD zeichnet einen diskreten Wert der reflektierten oder emittierten Strahlung der erfassten Fläche auf der Erdoberfläche als rechteckige bzw. quadratische Fläche –*Picture Elements (Pixel)*– auf. Hierbei wird die spektrale Charakteristik aller auf dieser Grundfläche befindlichen Objekte gemittelt und der Mittelwert als Helligkeitswert aufgezeichnet (siehe Abbildung 52). Ist die räumliche Auflösung geringer als die Objektgröße, entstehen durch die Mittelung der Objektreflexionen Mischpixel. Objekte können in Mischpixeln auch noch bei schlechterer räumlicher Auflösung identifiziert werden.



Quelle: [LHS2000]

Abbildung 52: Beispiel verschiedener räumlicher Auflösung

Chemo-optische Sensorsysteme auf Filmbasis zeichnen reflektierte Strahlung durch photosensitive Halogensilberkristalle auf, deren Größe sehr gering ist, d.h. die räumliche Auflösung ist sehr hoch. Sie ist jedoch nicht eindeutig festzulegen.

Die erreichbare räumliche Auflösung ist im Wesentlichen eine Funktion der Flughöhe der Sensorplattform.

### Temporale Auflösung

Die temporale Auflösung eines Fernerkundungssensors ist definiert als die Periodizität, innerhalb der ein Sensor ein neues Bild desselben Ortes der Erdoberfläche aufnehmen kann [Pas2000].

Sie ist primär abhängig von der Art der Sensorplattform. Man unterscheidet flugzeug- oder helikoptergestützte Plattformen, welche unterhalb der Tropopause operieren sowie satellitengestützte Plattformen im Orbit. Für flugzeug- oder helikoptergestützte Sensorplattformen kann keine Periodizität der Wiederkehr festgelegt werden, da sie sich nicht permanent über denselben Zielgebiet im Einsatz befinden bzw. nur im Rahmen von Einzelaufträgen zum Zielgebiet zurückkehren.

Für permanent im Orbit befindliche Sensorplattformen (Satelliten) ist die temporale Auflösung im Wesentlichen abhängig von der Höhe des Orbits. Hohe Orbits liefern kurze, niedrigere Orbits längere temporale Auflösungen. Zwischen der räumlichen und zeitlichen Auflösung eines satellitengestützten Sensorsystems entsteht hieraus ein Nutzungskonflikt: Hohe temporale Auflösung mit zunehmender Höhe des Orbits bedeutet gleichzeitig geringere räumliche Auflösung [Pas2000]. Die temporale Auflösung liegt für permanent im Orbit befindliche Sensorplattformen im Tages- bis Wochenbereich.

### Geometrische Eigenschaften

Jedes fernerkundlich aufgezeichnete Bild stellt die Erdoberfläche in einem bestimmten geometrischen Zustand dar. Dieser ist abhängig von der geometrischen Charakteristik des Sensors, aber auch von den operativen Bedingungen zum Aufnahmezeitpunkt (wie z.B. Flugstabilität), des Geländereiefs und weiteren Faktoren. Der ideale Fernerkundungssensor erzeugte verzerrungsfreie Bilder mit regelmäßigen geometrischen Beziehungen zu Punkten am Boden. Diese Anforderungen kann jedoch kein Sensor erfüllen. Jede fernerkundliche Aufzeichnung enthält geometrische Fehler, hervorgerufen durch die Optik des Sensors, die

Bewegung der Scanner-Optik, Geländere relief, und der Erdkrümmung. Die Intensität jeder Fehlerquelle kann variieren. Diese Fehler können bei der Weiterverarbeitung von Fernerkundungsdaten kompensiert werden, um flächen- bzw. formtreue Objekte einmessen zu können.



## 8.2 Sensorsysteme

In der vorliegenden Arbeit wird Bezug sowohl auf aktive als auch auf passive Fernerkundungssysteme genommen. Daher wird im Folgenden die Funktionsweise folgender Sensorsysteme erläutert:

- Chemo-optische Sensoren
- Elektro-optische Sensoren
- Synthetic Aperture Radar (SAR)-Sensoren
- Light Intensity and Range (LIDAR)-Sensoren

### 8.2.1 Chemo-optische Sensoren

Die zu der Klasse der passiven Sensoren gehörenden chemo-optische Sensoren zeichnen die spektrale Variation der von der Erdoberfläche reflektierten Sonnenstrahlung auf einem chemischen Bildträger, dem Luftbildfilm auf, dessen photosensitive Halogensilberkristalle auf Lichteinfluss reagieren.

#### Sensoraufbau

Ein chemo-optischer Sensor für Luftbildaufnahmen besteht aus folgenden Komponenten:

- Metrische Luftbildkamera mit eingeblendeten Rahmenmarken und Eigenbewegungskompensation der Sensorplattform durch Filmbewegung (Messkammer)
- Objektiv
- Drift-Kompensator zur Kompensation der Eigenbewegung der Sensorplattform um alle drei Achsen
- Gerät zur Steuerung des Aufnahmezeitpunktes und der Bildüberlappung
- Satelliten- und inertiale Navigationssysteme zum Aufzeichnen der Kameraausrichtung und Position zum Aufnahmezeitpunkt (optional)
- Sensorplattform (in der Regel Flugzeug)



Quelle: [NCDOT2005]



Quelle: Leica

Abbildung 53: Komponenten eines chemo-optischen Sensors und Sensorplattform

Messkammern sind für ein Standardbildformat von 23x23 cm ausgelegt und erzeugen Bilder in Zentralperspektive mit minimaler optischer und geometrischer Verzerrung.

Je nach gewünschter Abdeckung und Genauigkeit werden kürzere oder längere Brennweiten bevorzugt. Luftbildfilme unterscheiden sich hinsichtlich Auflösungsvermögen, Lichtempfindlichkeit, Kontrastreichtum und spektraler Empfindlichkeit. Zur vereinfachten Objektidentifizierung werden oft Farbfilme benutzt. Für chemo-optische Sensoren werden fast ausschließlich Flugzeuge als Sensorplattform benutzt.

### Datenprodukte

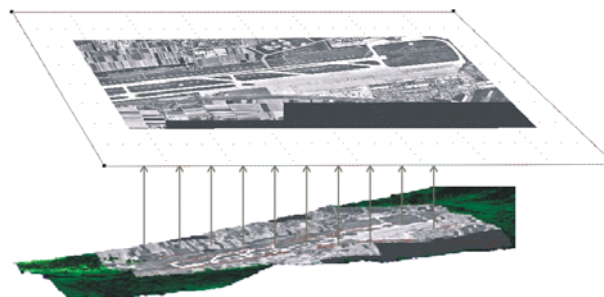
Folgende Datenprodukte können mittels chemo-optischer Fernerkundungssensoren generiert werden:



(Farb-)Luftbild



Stereoluftbilder



Orthobild

Quelle: Eigene Grafik

Abbildung 54: Datenprodukte chemo-optischer Sensoren

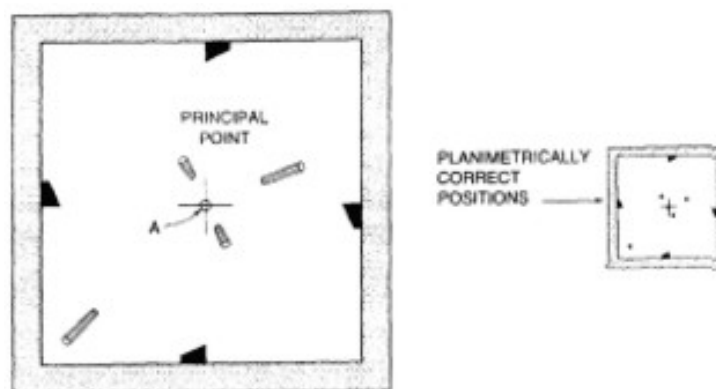
## Temporale Auflösung

Flugzeuggestützte Sensoren besitzen keine temporale Auflösung, da sie sich nicht ständig über demselben Zielgebiet im Einsatz befinden.

## Geometrische Eigenschaften

Chemo-optische Sensoren besitzen aufgrund der optischen Eigenschaften des Linsensystems sowie der Charakteristik des Luftbildfilmes die geometrischen Eigenschaften der Zentralperspektive. Die Zentralperspektive verursacht in dem Luftbild folgende Positionsfehler:

- Durch den Sensor verursachte optische Verzeichnungen (sphärische und chromatische Aberration, Bildfeldwölbung, Astigmatismus, Koma). Um Positionsfehler durch optische Verzeichnung zu vermeiden, sollten photogrammetrische Messkameras einmal pro Jahr kalibriert werden. Die Angaben des Kalibrierscheins bieten die Möglichkeit, Fehler durch optische Verzeichnungen bei der geometrischen Korrektur von Luftbildern zu kompensieren.
- Neigungsfehler werden durch Verschiebung der Brennebene des Bildes durch Eigenbewegung der Sensorplattform aus der senkrechten Lage verursacht. Der Mittelpunkt der Neigung liegt im Isozentrum. Durch die Bildneigung befinden sich einige Gebiete zum Aufnahmezeitpunkt näher an der Bildebene, andere weiter entfernt. Dadurch liegt im nicht korrigierten Originalbild kein einheitlicher Bildmaßstab vor.
- Reliefverschiebung ist die signifikanteste Fehlerquelle für Positionsfehler in Luftbildern. Ursache für die Reliefverschiebung ist die zentralperspektivische Darstellung. Objekte, die sich direkt unter dem Mittelpunkt der Kamera befinden, werden auf dem Luftbild so abgebildet, dass man nur die Oberfläche sieht. Weiter außen liegende Objekte werden so abgebildet, dass man sowohl ihre Oberfläche als auch die dem Mittelpunkt zugewandten Seitenflächen erkennen kann. Dieses Kippen tritt radial um den Nadirpunkt auf und verstärkt sich mit zunehmender Entfernung vom Nadirpunkt und mit der Objekthöhe. Es ist außerdem von der Flughöhe und der Brennweite des benutzten Objektivs abhängig. Je größer die Brennweite und die Flughöhe, desto geringer die Reliefverschiebung. Durch das Kippen der Objekte wird deren Lage falsch abgebildet, das Relief wird „verschoben“ [Cam1996].



Quelle: [Cam1996]

Abbildung 55: Reliefverschiebung

Mit zunehmender Abweichung vom Nadirfall, einem senkrecht unter der Objektivmitte liegenden imaginären Punktes auf der Erdoberfläche steigt der Betrag des Positionsfehlers.

Gemäß der Orientierung der Kamera zum Aufnahmezeitpunkt relativ zum Nadirpunkt werden Luftbilder in sechs Gruppen klassifiziert. Für den normalen Luftbildvermessungsfall sind lediglich die folgenden drei Gruppen relevant:

- Nadiraufnahme (Neigungswinkel 0 gon)
- Senkrechtaufnahme (Neigungswinkel 1-4 gon)
- Steilaufnahme (Neigungswinkel 5-15 gon)

[Wei1983]

Zur photogrammetrischen Auswertung eines chemo-optischen Luftbildes mit Zentralperspektive müssen die oben genannten Positionsfehler beseitigt werden.

### **8.2.1.1 Arbeitsablauf zum Erstellen von Flughafendatenbanken mittels Verfahren der digitalen Photogrammetrie auf Luftbildbasis**

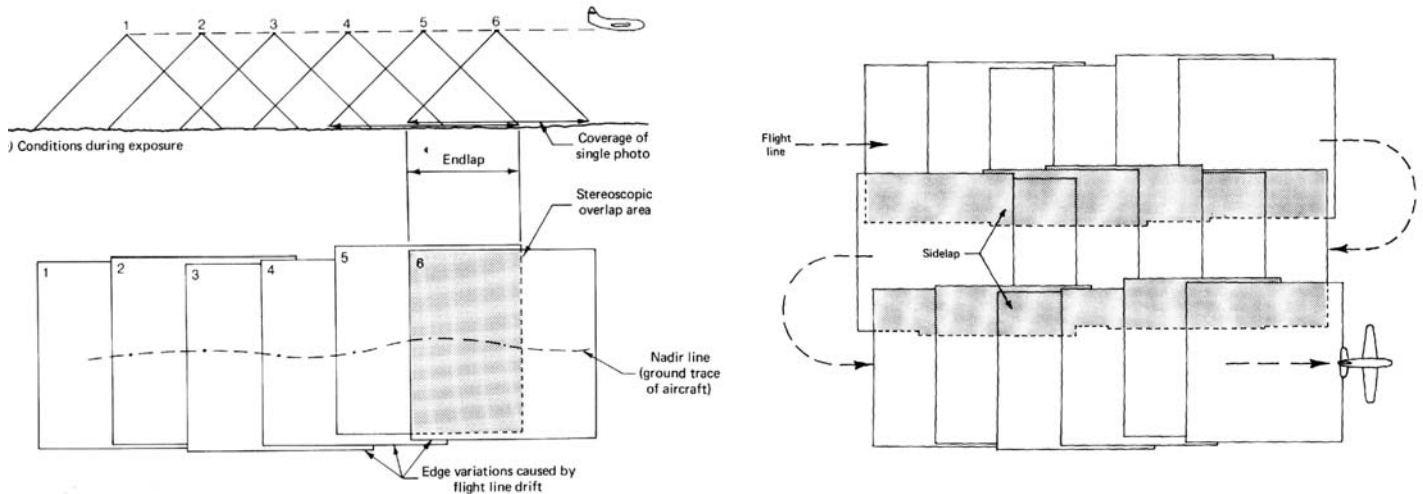
Zum Erfassen von Objektlage und -information durch Luftbildphotogrammetrie müssen Luftbilder zunächst aufgenommen und durch die Eliminierung der oben genannten geometrischen Fehler soweit aufbereitet werden, dass im Stereopaar oder Orthobild die Objektlageinformation extrahiert werden kann. Die Arbeitsabläufe der digitalen Photogrammetrie sind bis auf die Extraktion der spezifischen Objektinformation weitgehend softwareunterstützt und teilautomatisiert.

Die folgenden 6 Arbeitsschritte müssen zur Extraktion von Objektinformation aus chemo-optischen Luftbilder durchlaufen werden:

1. Akquisition des Bildmaterials
2. Scannen des Bildmaterials
3. Einmessung von Passpunkten (GCPs)
4. Innere Orientierung des Bildmaterials
5. Herstellung der äußeren Orientierung
6. Einmessen der Objektlage und -Information
  - a. 3-dimensional im Stereopaar
  - b. 2-dimensional im Orthobild

#### **1. Akquisition des Bildmaterials des Zielgebietes**

Luftbildbefliegungen werden als Streifen- oder Blockbefliegungen durchgeführt. Innerhalb eines Streifens überlappen die Einzelbilder in Flugrichtung um mindestens 60%, um neben Lage- auch Höheninformation durch stereoskopische Auswertung der Bildinformation gewinnen zu können. Ein Block besteht aus nebeneinander liegenden Luftbildstreifen, welche eine Seitenüberlappung von 10% - 15% besitzen, um die einzelnen Streifen räumlich miteinander verknüpfen zu können.



Quelle: [Lil1994]

Abbildung 56: Streifen- und Blockbefliegung

## 2. Scannen des Bildmaterials

Um die Bearbeitungsschritte computergestützt ausführen zu können, muss das aufgenommene Bildmaterial zunächst gescannt werden. Zum Scannen von analogem Bildmaterial werden hochpräzise Luftbildscanner genutzt. Damit keine Information verloren geht, muss das Digitalisierungsintervall  $\Delta D$  dem Auflösungsvermögen  $AV$  des photographischen Bildes, welches in Linienpaaren/mm angegeben wird angepasst werden. In Anlehnung an das Abtasttheorem ergibt sich ein Digitalisierungsintervall  $\Delta D$  von

$$\Delta D \leq 1/(2AV)$$

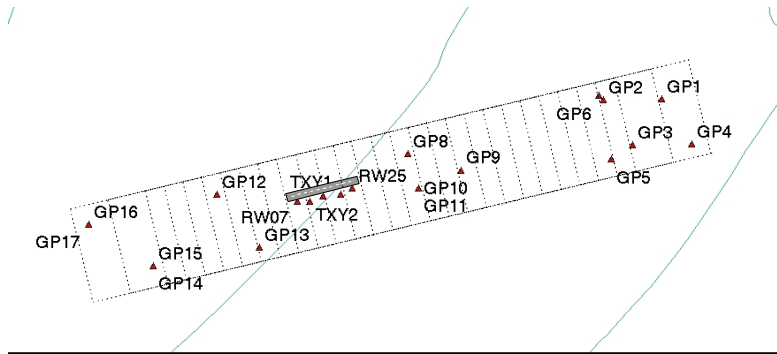
Formel 1: Digitalisierungsintervall [Kra1994]

In der Praxis wird mit 0,7 im Zähler gearbeitet [Kra1994]. Für ein Auflösungsvermögen von 50LP/mm liegt das berechnete Digitalisierungsintervall dann bei 7  $\mu\text{m}$ .

## 3. Einmessung von Passpunkten (GCPs)

Um über Kollinearitätsgleichungen die Beziehung zwischen Luftbildkoordinaten und dem Landeskoordinatensystem herstellen zu können, werden Punkte benötigt, die im Luftbild eindeutig zu identifizieren sind und deren 3-dimensionale Lage im Landeskoordinatensystem bekannt ist, so genannte Passpunkte (Ground Control Points - GCPs). Sie liefern die notwendige Information zum Lösen der Kollinearitätsgleichungen.

Man unterscheidet Vollpasspunkte (x,y,z-Koordinaten bekannt), Höhenpasspunkte (z-Koordinaten bekannt) und Lagepasspunkte (x,y-Koordinaten bekannt). Zur Aerotriangulation eines Block- oder Streifenverbandes werden im Minimum 3 Vollpasspunkte benötigt. Zufriedenstellende Ergebnisse mit hohen Genauigkeiten ergeben sich aber erst bei ausreichender Besetzung vorzugsweise der Blockränder mit Passpunkten [Kra1994]. In der Regel werden für jedes vierte Stereobildpaar (Stereomodell) Höhenpasspunkte zur Stabilisierung des Streifens eingemessen.



Quelle: Eigene Grafik

Abbildung 57: Verteilung von Vollpasspunkten (GCPs) im Streifenmodell für die Flughafendatenbank EDMA (Augsburg)

Als Passpunkte (GCPs) können vor dem Bildflug signalisierte Objekte oder gut zu identifizierende natürliche Objekte benutzt werden. Höhere Genauigkeiten liefern signalisierte GCPs; aus Kostengründen werden jedoch oft natürliche GCPs benutzt. Bei großen Bildmaßstäben bieten sich hierfür sich kreuzende Farbbahnmarkierungen, Kanaldeckel, Gebäude- und Feldecken an.



Quelle: Eigene Grafik

Abbildung 58: Signalisierter GCP und Einmessung eines natürlichen GCPs auf dem Flughafen Reno, Nevada

In Abhängigkeit von der benötigten Genauigkeit werden GCPs heute in der Regel mit differentiellen Satellitennavigationsverfahren (D-GPS) eingemessen und über lokale Transformationen in das Landeskoordinatensystem eingepasst. Bei Sensorplattformen, welche mit GPS/INS ausgerüstet sind, können die zum Aufnahmezeitpunkt gespeicherten Bildmittenkoordinaten und Lageparameter für jedes Bildes zur initialen Ausrichtung der Bilder im Bildverband oder bei hochgenauen Navigationssystemen (differentielles GPS mit INS-Unterstützung) auch zur äußeren Orientierung (siehe unten) des Bildverbandes genutzt werden, um die Anzahl der benötigten GCPs zu reduzieren.

#### 4. Innere Orientierung des Bildmaterials

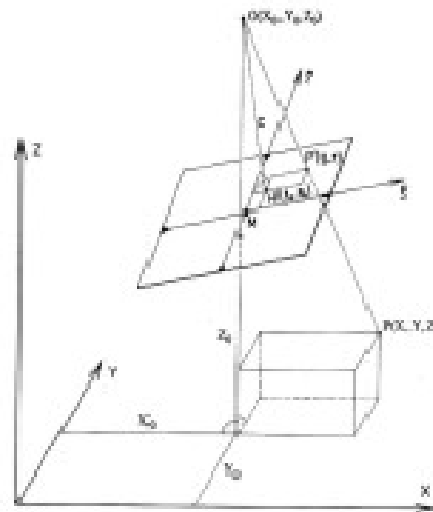
In einem idealen geometrischen Modell beschreiben die Parameter der Kammerkonstante und die Bildkoordinaten des Hauptpunktes die innere Orientierung eines Bildes. Durch Fehler der Optik, der Kamera und der Fotografie unterscheidet sich das physikalische Projektionszentrum jedoch in der Regel vom idealen Projektionszentrum. Zur physischen Definition des Bildkoordinatensystems und des zugeordneten Projektionszentrums werden auf dem Luftbild Rahmenmarken abgebildet. Über die Angaben des Kalibrierprotokolls der Messkammer können die Referenzkoordinaten der Rahmenmarken auf die Ist-Koordinaten referenziert werden. Hierdurch und durch genaue Angaben zur Brennweite und radialer

Verzerrung der Optik wird ein Teil der geometrischen Fehler sowie durch die Optik verursachte Fehler eliminiert.

### 5. Herstellen der äußeren Orientierung (Aerotriangulation)

Im Rahmen der äußeren Orientierung wird über Kollinearitätsgleichungen die Beziehung zwischen den durch die innere Orientierung bereinigten Bildkoordinaten und der Lage des Bildinhaltes in einem Landeskoordinatensystem hergestellt. Die sechs Parameter der äußeren Orientierung sind die Objektkoordinaten des Aufnahmeorts ( $X_0, Y_0, Z_0$ ) und die Drehwinkel des Bildes um die drei räumlichen Achsen ( $\omega, \phi, \kappa$ ).

Da die Parameter der äußeren Orientierung während des Bildfluges in der Regel nicht mit genügender Genauigkeit ermittelt werden können, bietet sich die indirekte Bestimmung über GCPs an, von denen Bild- und Objektkoordinaten bekannt sein müssen. In einem räumlichen Rückwärtsschritt wird unter Voraussetzung der Kollinearität des Objektpunktes, des Brennpunktes des Objektivs und des Bildpunktes mit den bekannten Bild- und Objektkoordinaten der GCPs die drei Rotationswinkel und die Objektkoordinaten des Projektionszentrums zum Aufnahmezeitpunkt ermittelt.

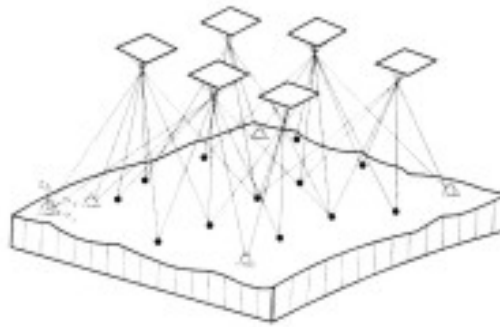


Quelle: [Kra1994]

Abbildung 59: Herstellen der äußeren Orientierung

Zur Herstellung der äußeren Orientierung und Ausgleichsrechnung von Bildblöcken oder Bildstreifen werden Verfahren der Aerotriangulation benutzt. Dabei handelt es sich um Verfahren zum Ausgleichen großer Bildblöcke mit minimaler Anzahl an GCPs. Der Zusammenhalt zwischen den Einzelbildern wird durch Verknüpfungspunkte geschaffen, identische Punkte auf zwei oder mehreren Bildern, die jedoch im ersten Schritt noch keinen Bezug zum Landeskoordinatensystem besitzen, sondern lediglich im Bildkoordinatensystem bekannt sind.

Die zwei am häufigsten benutzten Block-Triangulationsverfahren sind die Blockausgleichung mit unabhängigen Modellen und die Bündelblockausgleichung. Bei der Bündelblockausgleichung, dem genauesten Verfahren der Aerotriangulation, ist das Bild die Zentraleinheit. Der Zusammenhang zwischen Bild- und Objektkoordinaten wird direkt ohne Umweg über Modellkoordinaten hergestellt. Die Bildkoordinaten und das dazugehörige Projektionszentrum definieren ein räumliches Strahlenbündel. Die äußeren Orientierungselemente der Strahlenbündel werden bei der Bündelblockausgleichung für alle Bilder gleichzeitig hergestellt. Die Strahlenbündel werden verschoben und gedreht, bis die entsprechenden Strahlen an den Verknüpfungspunkten möglichst gut zum Schnitt kommen und mit GCPs möglichst gut zusammentreffen [Kra1994].



Quelle: [Kra1994]

Abbildung 60: Bündelblockausgleichung

Während früher die innere und äußere Orientierung sowie die Einmessung von Objektlage und –Information meist auf einem analytischem Auswertegerät mit Rechner erfolgte, wird heute in der Regel mit digitalen photogrammetrischen Workstations gearbeitet, was deutliche Vorteile bezüglich der Automatisierung durch Bildverarbeitungsalgorithmen bietet.

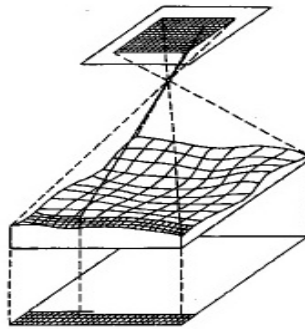
#### 6a. Einmessen der 3-dimensionalen Objektlage und –Information im Stereopaar

Zum Einmessen der 3-dimensionalen Objektlage und -Information können zwei überlappende Bilder durch Nutzung der in der Aerotriangulation berechneten Lage und Ausrichtung des Projektionszentrums zu einem Stereopaar überlagert werden. Zur Visualisierung werden spezielle Hilfsmittel benötigt, wie z.B. die Nutzung einer elektronischen Shutterbrille zum abwechselnden Einblenden des linken und rechten Stereobildes oder Polarisationsbrillen im Zusammenhang mit vertikalen und horizontalen Polarisationsverfahren. Die Einmessung der Objekthöhe wird durch die Auswertung der Stereoparallaxe eines Punkts zwischen beiden Bildern des Stereomodells ermöglicht. Der Operator bringt die in allen 3 räumlichen Ebenen bewegliche Messmarke (Cursor) in Übereinstimmung mit dem zu messenden Punkt in dem stereoskopisch wahrzunehmenden Objekt. Durch aufeinander folgende Einmessung von Einzelpunkten können Linienzüge und Flächen in allen drei Dimensionen eingemessen werden.

#### 6b. Einmessen der 2-dimensionalen Objektlage und Information im Orthobild

Ein Orthobild wird durch Transformation eines Luftbildes mit Zentralperspektive in ein Bild mit Orthogonalperspektive erzeugt, bei dem alle Strahlenverläufe parallel zueinander verlaufen. Unter Nutzung der in der Aerotriangulation berechneten Parameter des Projektionszentrums und eines Höhenmodells zur Eliminierung von Reliefverschiebungsfehlern wird das Luftbild im Rahmen der Orthokorrektur in ein Orthobild transformiert. Hierzu wird die Bildmatrix des Kamerakoordinatensystems auf eine Bildmatrix in der horizontalen (XY-) Ebene des Landeskoordinatensystems transformiert. Die Pixelwerte des Originalbildes werden mittels des Höhenmodells zur Korrektur der Reliefverschiebung der neuen Bildmatrix zugeordnet. Das resultierende Orthobild basiert auf einer horizontalen Ebene, wodurch alle hierauf durchzuführenden Objektlagemessungen lediglich 2-dimensional sind.





Quelle: [Höh2001]

Abbildung 61: Ableiten eines Orthobilds aus einem Luftbild und einem Geländemodell

Da in Geländemodellen in der Regel kleinvolumige Objekte wie z.B. Gebäude nicht enthalten sind, wird der Reliefverschiebungsfehler für kleinvolumige Objekte nicht korrigiert. Diese Objekte erscheinen im Orthobild nach wie vor zur Seite gekippt und enthalten bei der Einmessung einen Positionsfehler. Aufgrund der Zentralperspektive des ursprünglichen Luftbildes nehmen im Orthobild Positionsfehler als Funktion des Abstandes von der Bildmitte von nahezu Null nach außen hin zu. Deshalb ist auf die Lage des Zielgebietes in der Mitte des Orthobild zu achten [Kra1994].

Auf dem Orthobild können ohne weitere technische Hilfsmittel 2-dimensionale Objektlageinformationen eingemessen werden.

### 8.2.1.2 Chemo-optische Fernerkundungssysteme

Die folgende Tabelle gibt eine Übersicht über verschiedene kommerzielle chemo-optische Kamera-Systeme:

Sensorsystem	Sensorplattform	Geometrie	Temporale Auflösung
<b>Leica</b> RC-20 RC-30	Flugzeug	Zentral- perspektive	Nicht kontinuierlich (auftragsbasiert)
<b>Carl Zeiss</b> LMK 1015 LMK 15/23 RMK 1TOP RMK-15/23			
<b>KVR 1000</b> [Fri1999]	Satellit		

Tabelle 9: Übersicht kommerzieller chemo-optischer Fernerkundungssysteme

### 8.2.2 Elektro-optische Sensoren

Die zur Klasse der passiven Fernerkundungssensoren gehörenden elektro-optischen Sensoren zeichnen die spektrale, räumliche und radiometrische Variation der von der Erdoberfläche reflektierten und emittierten Strahlung durch linienhaft angeordnete Charged-Coupled-Devices (CCDs), Ladungsträger auf Silikonbasis, auf. Durch die zeilenhafte Anordnung der CCDs (daher auch der Name „Zeilenscanner“) wird eine hohe Signalintensität (Sensitivität) erreicht [Kap1994]. CCDs zeichnen spektrale und radiometrische Änderungen linear auch noch bei ungünstigen Lichtverhältnissen auf.

Im Gegensatz zu CCDs arbeiten ältere Return-Beam-Vidicon-Systeme (RBV) mit einer photosensitiven Oberfläche, auf der durch die auftreffende Lichtmenge ein Ladungsmuster erzeugt wurde, welches durch einen Elektronenstrahl abgetastet wurde. Sie befinden sich jedoch heute nur noch vereinzelt in Betrieb.

Im Gegensatz zu chemo-optischen Sensoren, welche mit flächenhaften Bildträgern arbeiten und Momentaufnahmen einer quadratischen Fläche unterhalb der Sensorplattform liefern, nehmen elektro-optische Sensoren das Zielgebiet mittels der linienhaft angeordneten CCDs Linie für Linie auf. Die Bildgeometrie unterscheidet sich daher wesentlich von der Zentralperspektive von chemo-optischen Sensoren.

#### Sensoraufbau

Elektro-optische Zeilenscanner werden weitgehend auf Satellitenplattformen eingesetzt. In den letzten Jahren werden sie verstärkt aber auch auf Flugzeugplattformen eingesetzt (z.B. HRSC-A, Leica ADS-40).

Ein satellitengestützter, elektro-optischer Zeilenscanner besteht aus

- einem präzisen, kalibrierten Aufnahmesystem mit einer oder mehreren Reihen CCDs, welche verschiedene radiometrische Spektren abdecken.
- einer stabilen optischen Plattform (Weitwinkel, Dualfocus).
- Präzisions-Ephemeris-Daten (für satellitengestützte Sensoren)
- Informationen über die Lage im Raum (mittels GPS und Startracker).
- einem Speichermedium zum Zwischenspeichern der aufgezeichneten Information.
- Kommunikationsmodulen zum Senden der aufgezeichneten Information an die Bodenstation.
- spezielle Prozessierungsalgorithmen in der Bodenstation.



Quelle: [NOAA2005]

Abbildung 62: Satellitengestützter, elektro-optischer Fernerkundungssensor Quickbird 2

Jeder Sensor erzeugt Signale, die nicht von der reflektierten oder emittierten Strahlung des Zielobjektes verursacht wurden, das so genannte Rauschen (*Noise*). Ursache sind

elektronische Fehler in verschiedenen Komponenten des Fernerkundungssystems. Zum effektiven Arbeiten müssen Sensoren so entworfen werden, dass das Verhältnis zwischen Rauschen und dem eigentlichen Signal (*Signal to Noise Ratio*) möglichst gering ist.

### Datenprodukte

Folgende Datenprodukte können mittels elektro-optischer Zeilenscanner erstellt werden:



Abbildung 63: Datenprodukte elektro-optische Fernerkundungssysteme

### Temporale Auflösung

Während die Flughöhe und Flugroute eines Luftbildfluges individuell auf die zu erreichende räumliche Auflösung und die räumliche Abdeckung abgestimmt werden kann, muss der Orbit eines Fernerkundungssatelliten langfristig definiert werden; spätere Korrekturen sind nur im begrenzten Umfang möglich. Für eine räumliche Abdeckung der gesamten Erdoberfläche werden in der Regel kreisförmige, polnahe und sonnensynchrone Umlaufbahnen gewählt, auf denen die Erde überall unter demselben Sonnenwinkel überflogen wird. Dies hat den Vorteil, dass alle Aufzeichnungen nahezu zur selben lokalen Sonnenzeit gemacht werden [Cam1996]. Satellitengestützte Systeme besitzen eine von der Satellitenbahn abhängige regelmäßige Wiederkehr. Da die Satellitenbahn ihre Lage im Raum beibehält, aber die Erdoberfläche unter dieser Bahn aufgrund der Rotation der Erdkugel hindurchwandert, sind die Bodenspuren der aufeinander folgenden Satellitenumläufe etwas gegeneinander versetzt. Die Bahnparameter sind so gewählt, dass nach und nach die ganze Erdoberfläche aufgenommen werden kann und sich der Vorgang nach einer festen Anzahl von Tagen wiederholt (Wiederkehr) bzw. dass eine optimale Periodizität für ein ausgewähltes Gebiet möglich ist. Um die temporale Auflösung zu erhöhen, können bei einigen Systemen die Optik bzw. der gesamte Satellit zur Seite geschwenkt werden, um ein seitlich des Nadir liegendes Zielgebiet zu erfassen, welches ohne Schwenkvorgang erst einige Umläufe später erfasst würde.

### Geometrische Eigenschaften

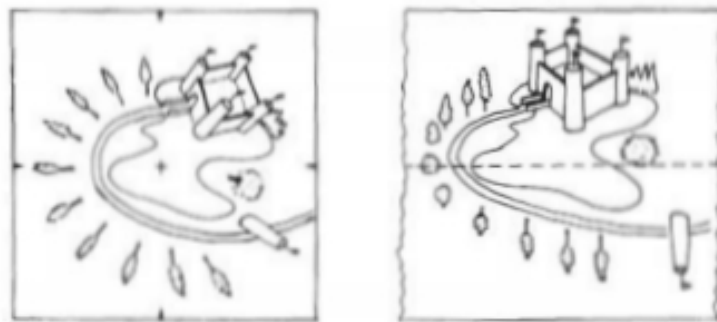
Bei heutigen Zeilenscannern sind CCDs in der Bildebene des Sensors so angeordnet, dass sie ein rechteckiges Sichtfeld (Instantaneous Field of View) im rechten Winkel zur Flugrichtung abdecken. Die Vorwärtsbewegung der Sensorplattform bewegt das Sichtfeld gleichmäßig vorwärts. Im Gegensatz zu früheren Systemen mit mechanischem Scanner besitzt der Zeilenscanner keine beweglichen Teile und hat somit eine vordefinierte geometrische Verzerrung. Da es sich beim Scanvorgang um einen kontinuierlichen Vorgang handelt, und nicht wie bei der chemo-optischen Photographie um eine Momentaufnahme, tritt beim Aufzeichnen jeder Scanzeile eine Lageversetzung zur vorherigen Zeile durch die

Erdrotation auf. Da die meisten Erderkundungssatelliten auf sonnensynchronen Bahnen um die Erde kreisen, wird die nächste Scanzeile auf dem absteigenden Teil des Orbits nach Westen versetzt; das georeferenzierte Bild besitzt hierdurch die Form eines Parallelogramms.

Beim Zeilenscanner besitzt jede Zeile ihren eigenen Nadirpunkt. Ein aufgezeichnetes Bild, welches aus mehreren Scanzeilen besteht, besitzt daher eine „Nadirlinie“ als Verbindung der einzelnen Nadirpunkte der Scanzeilen. Innerhalb einer Scanzeile werden alle CCDs zum selben Zeitpunkt belichtet.

Positionsfehler beim elektro-optischen Zeilenscannen werden durch folgende Effekte verursacht:

- Reliefverschiebung. Sie tritt nicht wie bei der Zentralperspektive des Luftbildes radial um den Nadirpunkt auf, sondern rechtwinklig zum Nadirpunkt jeder einzelnen Scanzeile (siehe Abbildung 64). Die gestrichelte Linie stellt die „Nadirlinie“ dar.



Quelle: [Lil1994]

Abbildung 64: Reliefverschiebung in der Zentralperspektive (links) und bei einem Zeilenscanner (rechts).

Der so erzeugte planimetrische Positionsfehler wird durch ausgeprägtes Relief verstärkt. Er lässt sich für satellitengestützte Sensoren als Funktion des Orbitalradius, der Geländehöhe sowie der Winkel zwischen Objekt und Nadir am Objektiv und am Erdmittelpunkt berechnen [Kap1994]. Der planimetrische Positionsfehler kann im Rahmen einer Orthorektifizierung mittels eines Geländemodells des Aufnahmeortes bis zu einem gewissen Grad zurückgerechnet werden.

- Optische Verzeichnungen. CCDs verlangen aufwendige optische Systeme, die kalibriert werden müssen. Optische Verzeichnungen können als systematische Fehler betrachtet und zurückgerechnet werden.
- Neigungsfehler des Aufnahmesystems spielen bei Zeilenscannern eine wichtige Rolle. Neigungsfehler müssen pro Scanzeile getrennt betrachtet werden und können nicht wie bei der Zentralperspektive für die gesamte Aufnahme kompensiert werden. Insbesondere bei flugzeuggestützten Zeilenscannern mit starken Bewegungen um alle drei Achsen fällt der durch Neigungsfehler des Aufnahmesystems erzeugte Positionsfehler besonders ins Gewicht. Durch Kenntnis der Fluglageparameter bei Aufnahme jeder Zeile kann dieser Fehler zurückgerechnet werden.

### Akquisition von Stereobildern

Großflächige Überlappungen wie bei Luftbildern treten zwischen aufeinander folgenden Scanzeilen nicht auf. Stereoüberlappung zum Erzeugen und Auswerten einer Stereoparallaxe wird im Zeilenscannerverfahren in der Regel auf andere Art erreicht:

1) Stereoüberdeckung durch seitliches Schwenken der Sensoren:

Zunächst wird auf einer Befliegungslinie das Zielgebiet senkrecht unter dem Sensor gescannt. Die nächste Befliegungslinie verläuft parallel zur ersten. Um zur Stereoüberdeckung dasselbe Zielgebiet wie bei der vorigen Befliegungslinie zu erfassen, wird die Optik des Sensors seitlich geschwenkt. Dadurch, dass dasselbe Zielgebiet aus zwei verschiedenen Perspektiven aufgezeichnet wird, wird die nötige Stereoparallaxe erzeugt. Dieses Verfahren wird häufig bei satellitengestützten Systemen verwendet (z.B. SPOT, IRS).

2) Stereoüberdeckung durch vorwärts- und rückwärtsblickende Sensoren:

Hierbei sind auf einer Sensorplattform zwei Sensoren eingebaut. Ein Sensor ist in Bezug auf die Flugrichtung leicht nach vorne gekippt, der andere leicht nach hinten. Beim Befliegen zeichnet der nach vorne gekippte Sensor das Zielgebiet aus einer nach vorne blickenden Perspektive auf. Kurze Zeit später zeichnet der nach hinten blickende Sensor dasselbe Gebiet aus der nach hinten blickenden Perspektive auf. Der Unterschied in der Perspektive erzeugt die notwendige Stereoparallaxe. Dieses System wird insbesondere bei Flugzeugplattformen eingesetzt (z.B. HRSC der DLR bzw. ADS-40 von Leica)

### **8.2.2.1 Arbeitsablauf zum Erstellen von Flughafendatenbanken mittels Verfahren der digitalen Photogrammetrie auf Satellitenbildbasis**

Das Extrahieren von Objektlage und -Information aus Satellitenbildern folgt weitgehend dem Vorgehen der digitalen Photogrammetrie auf Luftbildbasis. Zunächst muss eine Satellitenbildszene akquiriert und unter Eliminierung der oben genannten Fehler aufbereitet werden. Im fertig aufbereiteten Orthobild oder Stereopaar kann Objektlageinformation extrahiert werden. Die Arbeitsabläufe sind hierbei bis auf die eigentliche Objektextraktion weitestgehend automatisiert.

Die folgenden sechs Arbeitsschritte müssen durchlaufen werden:

1. Akquisition einer Satellitenbildszene des Zielgebietes
2. Radiometrische Korrektur der Satellitenbild-Rohdaten
3. Geometrische Korrektur und Georeferenzierung
4. Einmessen der Objektlage und Objektinformation
  - a. 2-dimensionale Objektlage im Orthobild
  - b. (3-dimensionale Objektlage im Stereopaar)

#### **1. Akquisition eines Satellitenbildes des Zielgebietes**

Die Akquisition eines Satellitenbildes eines definierten Zielgebietes wird bei modernen elektro-optischen Fernerkundungssensoren von der Bodenstation gesteuert. Aufgrund der hohen Datenmengen und der limitierten Speichermöglichkeiten an Bord des Satelliten sowie der Verteilung der Bodenempfangsstationen zeichnet der Sensor in der Regel nicht kontinuierlich auf, sondern wird von der Bodenstation auftragsabhängig programmiert. Um die temporale Auflösung zu verbessern, können einige Sensoren zur Seite geschwenkt werden, wodurch ein bestimmtes Zielgebiet schneller erfasst werden kann als wenn die Zielannäherung allein durch die kontinuierliche Drehung der Erde und der Sensorbewegung auf der Sensorbahn stattfindet.

Die lokale Sonnenzeit, der Aufnahmewinkel und insbesondere die Wolkenbedeckung im Zielgebiet beeinflussen die Qualität der Aufnahme.

## 2. Radiometrische Korrektur der Satellitenbild-Rohdaten

Um radiometrische Verzerrungen und systematische radiometrische Fehler zu korrigieren, werden die Satellitenbild-Rohdaten am Boden zunächst radiometrisch korrigiert. Die Korrekturen umfassen unter anderem

- Die Korrektur des relativen radiometrischen Verhaltens der einzelnen CCD-Detektoren, um Variationen der radiometrischen Empfindlichkeit zwischen Bildelementen (Pixeln) zu beseitigen
- Das Auffüllen von Bildlücken wegen ausgefallener CCDs durch definierte Werte
- Die Korrektur des absoluten radiometrischen Verhaltens der einzelnen CCD-Detektoren durch Messergebnisse von Testfeldern

Zusätzlich werden die Aufzeichnungen der Kanäle geometrisch aufeinander abgeglichen, um die spätere Überlagerung einzelner Kanäle verschiedener Spektralbereiche zu ermöglichen.

## 3. Geometrische Korrektur und Georeferenzierung

Im Rahmen der geometrischen Korrektur werden zunächst bekannte geometrische Fehler des Sensors korrigiert:

- Korrektur der internen Sensorgeometrie
- Optische Verzeichnungen
- Neigungsfehler

Hierzu werden im Voraus erzeugte und durch Messfelder am Boden ständig erneuerte Kalibrierungsprotokolle sowie die Kenntnis der Sensorlage beim Aufzeichnen genutzt. Unter Nutzung der Eingangsvariablen wird das ursprüngliche Satellitenbild in eine neu definierte sensorfeste Bildmatrix transformiert.

Eine Georeferenzierung kann durch die genaue Kenntnis der Sensorlage und Position im Raum erfolgen. Über ein Sensormodell, welches eine mathematische Beschreibung der Aufnahmegeometrie und der Optik umfasst, sowie der Kenntnis der

- Sensorposition in Bezug auf ein erdfestes System
- Sensorbewegungsrichtung und Geschwindigkeit in Bezug auf ein erdfestes System
- Erdrotation

kann jede einzelne Zeile auf ein erdfestes Bezugssystem georeferenziert werden. Unter Kenntnis der Lage- und Bewegungsparameter wird die um systematische Fehler bereinigte Szene in eine auf ein Landeskoordinatensystem bezogene Matrix mit gleichmäßigem Rasterabstand transformiert. Hierbei wird auch die räumliche Auflösung, welche durch die unterschiedliche Lage von CCD-Detektoren relativ zum Nadirpunkt innerhalb einer Zeile von der Mitte nach außen hin zunimmt, angeglichen.

Aufgrund der großen Aufnahmehöhe bewirken selbst geringste Ungenauigkeiten der Eingangsvariablen zur Georeferenzierung eine erhebliche Lageungenauigkeit der georeferenzierten Szene. Zur Verbesserung der Positionsgenauigkeit können daher noch zusätzliche am Boden eingemessene und in der Satellitenbildszene zu identifizierende GCPs mit in die Georeferenzierung mit einfließen.

Zur Kompensation von Reliefverschiebungen in Gebieten mit hoher Reliefenergie kann unter Nutzung eines Geländemodells eine Orthokorrektur durchgeführt werden.

#### 4. Einmessen der Objektlage und Objektinformation

Ebenso wie beim Luftbild kann die Objektlage und Objektinformation in einer georeferenzierten Satellitenbildszene 2-dimensional im Orthophoto oder, falls Stereoszenen vorhanden sind, 3-dimensional im Stereopaar eingemessen werden.

Zur Erleichterung der Objektidentifizierung werden Satellitenbildszenen oft in natürlichen Farben dargestellt. Hierzu werden die Kanäle rot, grün und blau in der Darstellung kombiniert.

#### 8.2.2.2 Übersicht kommerzieller elektro-optischer Fernerkundungssysteme

Die folgende Tabelle gibt eine Übersicht über die wichtigsten kommerziellen elektro-optischen Fernerkundungssysteme:

Sensorsystem	Plattform	Geometrie	Temporale Auflösung
DLR <b>HRSC-A</b> [Fri199]	Flugzeug	Pushbroom- Zeilenscanner	Nicht kontinuierlich (auftragsbasiert)
Leica <b>ADS-40</b> [San2000]			
GeoEye <b>GeoEye 1</b> [Geo2008]	Satellit		< 3 Tage
GeoEye <b>Ikonos 2</b> [NOAA2005]			3 Tage
DigitalGlobe <b>Quickbird 2</b> [NOAA2005]			1-3.5 Tage
DigitalGlobe <b>Worldview 1</b> [Dig2008]			1.7 – 4.6 Tage
ImageSat Int. <b>EROS A</b> [ITC2005]			2.5 Tage
ImageSat Int. <b>EROS B</b> [Ima2007]			2.5 Tage
<b>IRS P6</b>			5 Tage
SpotImage <b>SPOT 5</b> [NOAA2005]			4 Tage
NOAA <b>Landsat 7</b> [NOAA2005]		Zeilenscanner mit bewegtem Spiegel-System	16 Tage

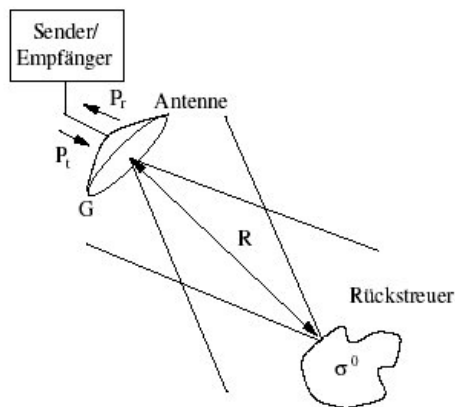
Tabelle 10: Übersicht kommerzieller elektro-optischer Fernerkundungssysteme

### 8.2.3 Synthetic Aperture Radar

Synthetic Apertur Radar (SAR) gehört zur Gruppe der aktiven Fernerkundungssensoren, welche nicht die Reflektionen der Sonneneinstrahlung durch den Erdboden aufzeichnen, sondern eine eigene Strahlungsquelle besitzen. Damit unterscheidet es sich grundlegend von den bisher behandelten passiven Fernerkundungssensoren.

Die Radarstrahlung gehört zur Mikrowellenstrahlung und erlaubt Aufzeichnungen der Reflektion unabhängig von Wetter und Tageszeit, da sie, abhängig von ihrer Wellenlänge, Wolken, Dunst, Rauch und Schnee durchdringt. Lediglich bei starkem Regen kann eine Beeinflussung der Reflektion stattfinden [SAN1998].

Das Radar strahlt Signale mit einer bestimmten Wellenlänge in einem langen, schmalen Winkel senkrecht zur Flugachse (Range) in Richtung Erdoberfläche aus. Die Strahlung wird von der Erdoberfläche teilweise reflektiert und die Reflektion vom Sensor wieder empfangen. Durch Kenntnis des Ausbreitungsverhaltens des Signals und der gemessenen Signallaufzeit kann die Entfernung zwischen Antenne und bestrahlter Erdoberfläche ermittelt werden.



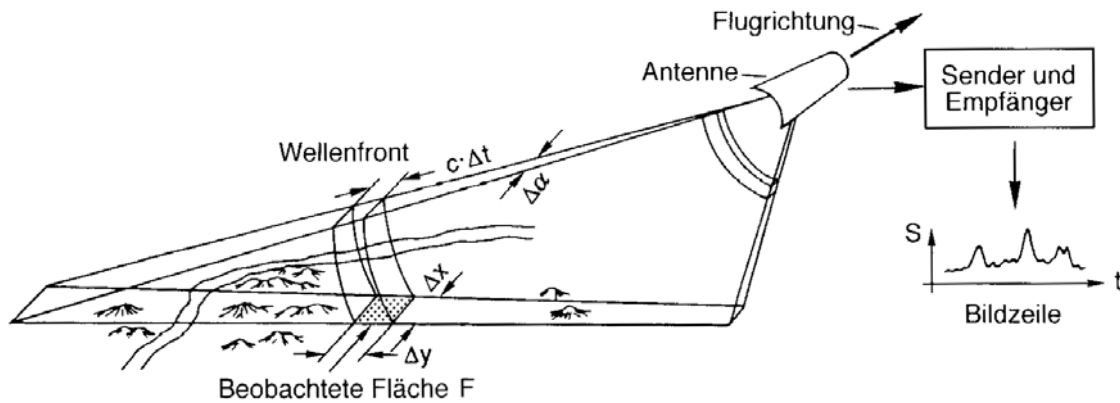
Quelle: [KAL2003]

Abbildung 65: Radarprinzip

Da die reflektierte Mikrowelle durch die Rückstreuereigenschaften des bestrahlten Streukörpers beeinflusst wird, kann durch die Messung der Intensität der Rückstrahlung eine Aussage über die Reflektionseigenschaften und räumliche Verteilung von Objekten getroffen werden.

Abbildung 65 skizziert die Funktionsweise eines einfachen Radarsystems. Im Flugzeug wird ein kombinierter Sender/Empfänger mitgeführt, dessen Antenne schräg nach unten gerichtet ist. Sie ist so konstruiert, dass sich die in einem Bruchteil einer Sekunde ausgestrahlten Mikrowellen in einen sehr schmalen, aber langen Raumwinkel hinaus senkrecht zur Flugrichtung ausbreiten. Zu einem bestimmten Zeitpunkt erreicht die Front der ausgesandten Wellen ein bestimmtes Flächenelement des Geländes. Von diesem wird die auftreffende Mikrowellenstrahlung teilweise reflektiert; ein mehr oder weniger großer Anteil der reflektierten Strahlung kehrt zurück zur Antenne und wird dort als Signal empfangen und aufgezeichnet. Da die von den Mikrowellen bestrahlte Fläche über das Gelände hinwegwandert, können die Reflexionssignale von einem schmalen Streifen der Erdoberfläche nacheinander erfasst und so als Bildzeilen der rückgestrahlten Reflexionsintensitäten aufgezeichnet werden.





Quelle: [ALB2001]

Abbildung 66: Schematische Darstellung einer Radaraufnahme

Durch die Vorwärtsbewegung des Flugzeugs entsteht dann - wenn die Folge von Senden und Empfangen systematisch wiederholt wird - eine vollständige zeilenweise Bildaufzeichnung eines neben dem Flugzeug verlaufenden Geländestreifens. Ein nach diesem Prinzip arbeitendes System wird Seitensicht-Radar (Sidelooking-Airborne-Radar oder *SLAR*) genannt.

Die Größe der durch Aussendung einer einzelnen Wellenfront bestrichene Erdoberfläche  $F$  (siehe Abbildung 66) ist maßgeblich vom räumlichen Abstrahlwinkel  $\Delta\alpha$  abhängig, welcher durch die Länge der mitgeführten Antenne festgelegt wird. Je kürzer die Antenne, desto geringer ist der räumliche Abstrahlwinkel in Flugrichtung und umso geringer ist die Auflösung der im Empfänger aufgezeichneten einzelnen Bildzeile.

Um in Flugrichtung eine höhere Auflösung zu erreichen und insbesondere die Aufnahme von Radarbildern auch von Satelliten aus möglich zu machen, werden Radar-Systeme mit Synthetischer Apertur (Synthetic-Aperture-Radar oder *SAR*) eingesetzt. Diese Systeme nutzen nur eine kurze Antenne, welche die Mikrowellenimpulse mit dem räumlichen Abstrahlwinkel  $\Delta\alpha$  abstrahlt. Während des Fluges werden die einzelnen Oberflächenpunkte aber wiederholt bestrahlt. Dementsprechend tragen sie mehrfach zu den empfangenen Reflexionssignalen bei, welche dadurch miteinander korreliert werden können. Bei der Verarbeitung können die Daten so behandelt werden, als würden sie von einzelnen Elementen eines sehr langen Antennenarmes stammen. Dadurch lassen sich Bilddaten mit hoher geometrischer Auflösung ableiten. Je weiter die Oberflächenpunkte von der Antenne entfernt sind, desto häufiger werden sie abgebildet und desto länger ist die scheinbare (synthetische) Antenne. Dies führt dazu, dass die räumliche Auflösung in der Flugrichtung entfernungsunabhängig wird. Die nur zehn Meter lange SAR-Antenne von ERS-Satelliten erreicht dadurch das gleiche Auflösungsvermögen wie eine reguläre Radarantenne von 800 m Länge und liefert Radarbilder der Erdoberfläche mit einer Bildpunktgröße von 30 x 30 m [Lex2005].

### Sensoraufbau

Ein Synthetic-Aperture-Radar besteht aus den Komponenten

- Sende- und Empfangsantenne
- Energiequelle zum Erzeugen der Mikrowellenstrahlung
- Navigationssystem, welches absolute Information über die Lage im Raum liefert
- Trägerplattform
- Präzisions-Ephemeris-Daten (für satellitengestützte Sensoren)

- einem Speichermedium zum Zwischenspeichern der aufgezeichneten Information
- Kommunikationsmodule zum Senden der aufgezeichneten Information an die Bodenstation (für satellitengestützte Sensoren)



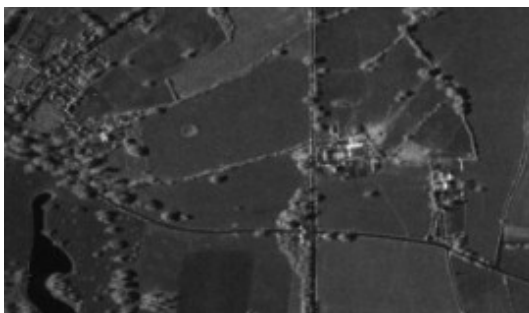
Quelle: [NOAA2005]

Abbildung 67: Radarsat Synthetic-Aperture-Radar Sensor

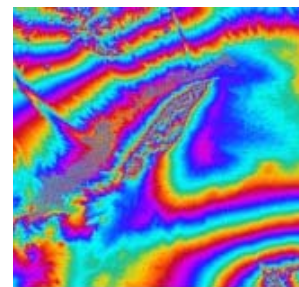
### Datenprodukte

Bei Synthetic-Aperture-Radarsystemen wird die Intensität der reflektierten Strahlung als Radar-Intensitätsbild aufgezeichnet. Ein Radar-Intensitätsbild stellt die Intensität der Rückstrahlung des ausgesandten Signals durch die am Erdboden befindlichen Objekte dar. Die Darstellung der Rückstrahlungsintensität der Erdoberfläche im Radar-Intensitätsbild ist abhängig von den Reflektionseigenschaften der Objekte in Bezug auf die genutzte Radarstrahlung. Das Radar-Intensitätsbild entspricht nicht der natürlichen Wahrnehmung des Menschen, da Radarsensoren empfindlich für einen Spektralbereich außerhalb des Spektralbereichs des sichtbaren Lichtes sind. In Radaraufnahmen sind daher vielfach linienhafte Objekte zu erkennen, die in Luft- oder Satellitenbildern kaum sichtbar wären. Grundlegend sind hier die vollkommen andersartigen physikalischen Hintergründe des Bildkontrastes eines Radarintensitätsbildes. Liegen räumlich überlappende Radarintensitätsbilder vor, kann in einem photogrammetrischen Verfahren durch Auswertung der Stereoparallaxe zwischen den Stereobildern ein Höhenmodell generiert werden.

Ebenso kann für jeden Bildpunkt im Radarbild die Laufzeit, definiert über die Anzahl der einzelnen Phasen, vom Sensor bis zur Erdoberfläche aufgezeichnet und diese Information über die bekannte Ausbreitungsgeschwindigkeit sowie die Kenntnis der Sensorlage und Sensorposition in ein Höhenmodell umgesetzt werden. Da die Phase von Rauschen überlagert wird, kann eine direkte Auswertung der Distanz nicht erfolgen. Da im SAR-Verfahren identische Punkte der Erdoberfläche im Überflug aus verschiedenem Winkel mehrmals aufgezeichnet werden, können die Phasen voneinander subtrahiert und somit ein Phasendifferenzbild (Interferogramm) gebildet werden, in dem das Rauschen eliminiert ist [ERD1999]. Dieses Verfahren wird auch als Interferometrie bezeichnet.



Radar-Intensitätsbild



Phaseninterferogramm

Abbildung 68: Datenprodukte Synthetic-Aperture-Radar (SAR)

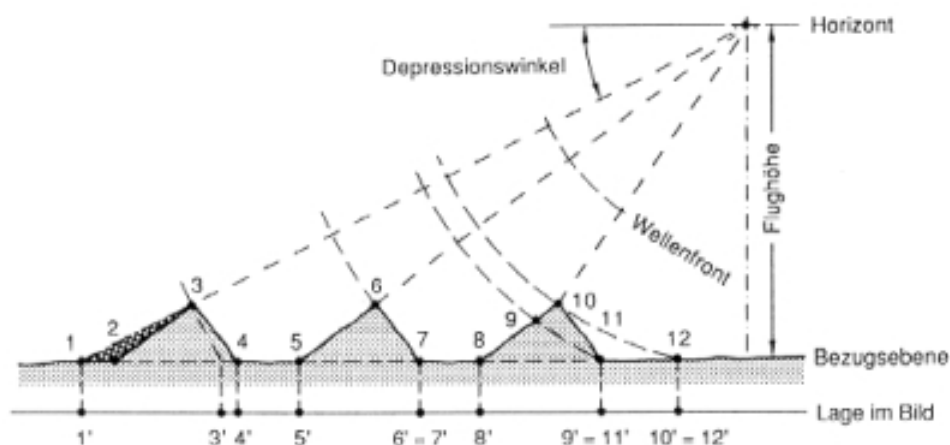
Phaseninterferogramme enthalten ausschließlich den über die Laufzeit ermittelten Abstand zur Erdoberfläche und keine Information zur Objektunterscheidung. Sie bilden somit keine Basis zur Objektextraktion von visuell zu identifizierenden Flughafenobjekten, ausgenommen Volumenobjekten mit 3-dimensionaler Ausdehnung, wie z.B. Gebäude. Im Folgenden werden daher lediglich Radar-Intensitätsbilder evaluiert.

### Temporale Auflösung

Je nach Sensorplattform ist die temporale Auflösung auftragsabhängig (bei flugzeuggestützten Systemen) oder wird durch eine regelmäßige Wiederkehr (bei satellitengestützten Systemen) charakterisiert.

### Geometrische Eigenschaften

Die Geometrie von Radarintensitätsbildern hat Ähnlichkeit mit der Geometrie von elektro-optischen Zeilenscannern. Die Bilddaten werden fortlaufend senkrecht zur Flugrichtung aufgezeichnet. In Flugrichtung entspricht dies einer Parallelprojektion. In Zeilenrichtung ergibt sich jedoch ein ganz anderes Bild: Lage und geometrische Verzerrung der Flächenelemente ergibt sich aus der Laufzeit der Wellenfronten, ihrem Echo und den abgeleiteten Schrägentfernungen der Objekte in Bezug auf die Radarantenne. Für eine ebene Fläche werden die Reflexionssignale entsprechend ihrer Laufzeit (bzw. Schrägentfernung) in Bilddaten umgesetzt, mit der Folge einer laufzeitbedingten geometrischen Lageverzerrung. Eine nahe gelegene Geländestrecke wird von der Wellenfront schneller durchlaufen als eine ferne. Also wird sie im Schrägentfernungsbild verkürzt wiedergegeben und umgekehrt.



Quelle: [Alb1991]

Abbildung 69: Auswirkungen des Geländereiefs auf Radarbilder

Wie in Abbildung 69 dargestellt, wird der am weitesten entfernte Berg von der Wellenfront zuerst am dem Sensor zugewandten Fuße des Berghanges und erst danach am Gipfel getroffen. Die reale Strecke Bergfuß/Berggipfel wird in der Bildbezugsebene um das Projektionsverhältnis von Punkt 3 und 4 verkürzt dargestellt (Distanz Punkt 4' zu 3'). Die dem System abgewandte Seite des Berges wird überhaupt nicht wiedergegeben (Radarschatten). Werden Fuß- und Gipfelpunkt gleichzeitig erreicht, kommt es zu einem weiteren Schrumpfen der Entfernungen (sog. Foreshortening); wird der Gipfel vor dem Fußpunkt durch die Wellenfront erreicht, kommt es zu Überlagerungen (Layover).

Grundsätzlich werden Geländepunkte, die in einer gemeinsamen Bezugsebene liegen grundrissgetreu abgebildet. Höher gelegene Geländepunkte werden zum Radarsystem hin versetzt dargestellt. Ist der Depressionswinkel größer als die Hangneigung kommt es zu Überlagerungen der Empfangssignale.

Unter Kenntnis der Morphologie lassen sich die geometrischen Verzerrungen in Zeilenrichtung korrigieren.

### **8.2.3.1 Arbeitsablauf zum Erstellen von Flughafendatenbanken basierend auf Radar-Intensitätsbildern**

Zum Erstellen von Flughafendatenbanken basierend auf Radar-Intensitätsbildern müssen die folgenden 3 Arbeitsschritte durchlaufen werden:

1. Akquisition des Bildmaterials
2. Geo- und Orthorektifizierung
3. Einmessen der Objektlage und -Information im Orthobild

#### **1.) Akquisition des Bildmaterials des Zielgebietes**

Die Akquisition des Bildmaterials im Zielgebiet kann durch satellitengestützte oder flugzeuggestützte SAR-Systeme erfolgen. Im Gegenteil zu optischen Sensoren sind SAR-Systeme weitgehend wetter- und vollständig beleuchtungsunabhängig.

#### **2.) Geo- und Orthorektifizierung**

Ziel der Geo- und Orthorektifizierung ist das Herstellen der korrekten geometrischen Beziehung zwischen einem Zielobjekt auf der Oberfläche und der Abbildung auf dem Sensorbild unter Berücksichtigung der Geländeoberfläche. Hierzu wird zunächst der Zusammenhang zwischen dem Zielobjekt und seiner Abbildung im Sensorbild unter Annahme einer flachen Geländeoberfläche hergestellt. Hierzu wird die Kenntnis der Sensorlage und Position zum Aufnahmezeitpunkt jeder Bildzeile sowie ein Sensormodell benötigt, welches die Ausbreitungscharakteristik der Mikrowellenstrahlung in Bezug auf das genutzte Sensorsystem modelliert. Zur Verbesserung der Positionsgenauigkeit können GCPs am Boden genutzt werden. Aufgrund der Darstellung im Radar-Intensitätsbild können jedoch natürliche GCPs in der Regel nicht genutzt werden. GCPs müssen durch spezielle Radarreflektoren mit besonderem, sich von der umgebenden Oberfläche stark unterscheidenden Reflektionscharakteristika signalisiert werden. Dies erleichtert ihre Identifizierung im Radarintensitätsbild.

Zur Eliminierung der radarspezifischen Reliefverschiebung wird im nächsten Schritt die Geländehöhe des Zielobjektes unter Kenntnis der Sensorlageinformation und des Sensormodells aus einem vorliegendem Geländemodell entnommen oder per Phaseninterferogramm gewonnenen und im Rahmen der Orthorektifizierung die Reliefverschiebung korrigiert.

#### **3.) Einmessen der Objektlage und -Information im Orthobild**

Zum Einmessen der Objektlage und -Information ist die Kenntnis der objektspezifischen Reflektionscharakteristika notwendig, da sich die Darstellung im Radarintensitätsbild deutlich von der natürlichen Darstellung von Objekten unterscheidet, wie sie sich im chemo-optischen Luftbild bzw. im elektro-optischen Satelliten- oder Luftbild darstellt. Um korrekt identifiziert und eingemessen werden zu können, muss sich die Reflektionscharakteristik eines Objektes deutlich von der Reflektionscharakteristik umgebender Objekte unterscheiden. Die Einmessung im Radarintensitäts-Orthobild erfolgt 2-dimensional.

### 8.2.3.2 Übersicht kommerzieller SAR-Fernerkundungssysteme

Die folgende Tabelle gibt eine Übersicht über die wichtigsten kommerziellen SAR-Fernerkundungssysteme:

Sensor-System	Plattform	Geometrie	Temporale Auflösung
Intermap <b>STAR 3i</b> [Int2004]	Flugzeug	SAR	Nicht kontinuierlich (auftragsbasiert)
AeroSensing <b>AeS-1</b> [BLV2000]			
CCRS <b>Radarsat</b> [ITC2005]	Satellit		5 Tage (30 m räumliche Auflösung) 10 Tage (8m räumliche Auflösung)
ESA <b>ERS 2</b> [ITC2005]			35 Tage
ESA <b>ENVISAT</b> [ITC2005]			35 Tage

Tabelle 11: Übersicht kommerzieller SAR-Fernerkundungssysteme

### 8.2.4 LIDAR

LIDAR (Light Detection and Ranging) wird auch als Laserscanning bezeichnet, teilweise spricht man auch von Laseraltimetrie. Beim LIDAR-Verfahren wird die Erdoberfläche mit Hilfe eines Laserstrahls abgetastet. Aus der Laufzeit des Impulses vom Senden bis zum Empfang desselben wird die Entfernung zwischen dem Laserscanner und der Geländeoberfläche, welche das Signal reflektiert, berechnet. Aus der Laufzeit lässt sich die Entfernung zum Sensor berechnen. Zusätzlich zur Laufzeit kann für jedes Signal die Reflektionsintensität aufgezeichnet werden, ähnlich der eines Radarintensitätsbildes.

Für LIDAR werden in der Regel Flugzeuge als Trägerplattform genutzt. Der LIDAR sendet in regelmäßigen Abständen einen Laserstrahl aus, welcher vom Erdboden reflektiert wird. Die Zeitdifferenz zwischen Senden und Empfang der reflektierten Laserimpulse wird von der Empfangseinheit im Flugzeug gemessen. Die äußere Orientierung, d.h. die Position und die Lage des Sensors im Raum wird in der Regel mittels D-GPS und einem inertialen Navigationssystem ermittelt. Zusammen mit der kontinuierlichen Aufzeichnung des Scanwinkels lässt sich für jeden Reflexionspunkt des Laserimpulses auf der Erdoberfläche dessen Position in allen drei Dimensionen in einem erdfesten Bezugssystem ermitteln.

Ein Laserstrahl hat bei 1.000 m Flughöhe am Boden einen Durchmesser von ca. 25 cm. Er kann auf dem Weg zum Erdboden mehrmals auf andere Objekte, z.B. Belaubung von Bäumen treffen und von dort reflektiert werden. LIDAR ist in der Lage, diese Mehrfachreflexionen zu unterscheiden. Wird die erste Reflexion aufgezeichnet, handelt es sich häufig nicht um einen Bodenpunkt sondern z.B. um die Vegetation. Für die letzte aufgezeichnete Reflexion kann dagegen mit hoher Wahrscheinlichkeit angenommen werden, dass es sich um einen Bodenpunkt handelt. Der Aufzeichnungsmodus ist entsprechend der gewünschten Anwendung auf die Erfassung der Bodenoberfläche (letzte Reflexion) und/oder der tatsächlichen Oberfläche (erste Reflexion) einstellbar.

Einige LIDAR-Systeme sind in der Lage, die Signalstärke des ausgesandten und von einem Messobjekt reflektierten Laserpulses zu vermessen. Die Intensitätsmessung dient unter anderem dazu, Objekte identifizieren zu können, die im LIDAR-Höhenmodell (aus der Laufzeit des Laserimpulses abgeleitet) nicht erkannt werden können, da sie dieselbe Höhe oder eine nicht signifikante Form besitzen (wie z.B. Fahrbahnmarkierungen auf Straßen).

Die gemessenen Intensitätswerte sind abhängig von den Reflektionscharakteristika des Objekts in Bezug auf die genutzte Wellenlänge des Lasers. Jede einzelne Intensitätsmessung wird als Grauwert dargestellt. Mit Hilfe der Flugpfadinformation (Position und Lage des LIDAR-Systems im Raum zum Aufnahmezeitpunkt) und der dazugehörigen Entfernungsmessung wird die Lage im Raum für jede einzelne Intensitätsmessung berechnet. Um aus den diskret und unregelmäßig verteilten Reflektionspunkten ein Bild zu erhalten, werden dies in ein regelmäßiges Raster transformiert [Top2005].

#### Sensoraufbau

Ein LIDAR-Sensorsystem besteht aus den folgenden Komponenten:

- Lasereinheit
- Inertiales Navigationssystem (Flugzeuglage)
- Differentielles GPS (Flugzeugposition)
- Trägerplattform

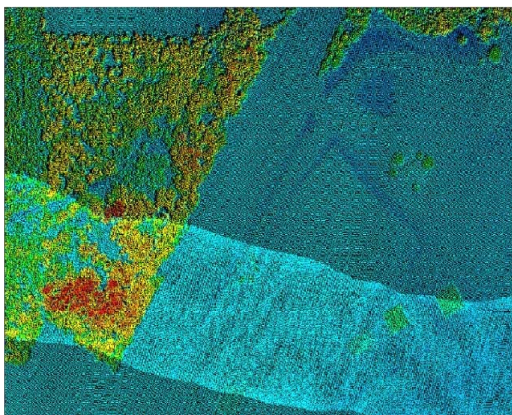


Quelle: [NGS2001]

Abbildung 70: Optech ALTM -33 kHz LIDAR-System

### Datenprodukte

LIDAR-Systemen dienen in erster Linie zum Einmessen von Höhenpunkten. Messpunktswolken von in dichtem Abstand zueinander liegenden Höhenmesspunkten können durch räumliche Interpolationsalgorithmen in ein gleichmäßiges Bildraster transformiert und als Geländemodell wiedergegeben werden. Ebenso kann über die Messung der Reflektionsintensität jedes Messpunktes ein Intensitätsbild erzeugt werden, welches zur Objektidentifizierung und –Einmessung genutzt werden kann.



Höhenmesspunkte



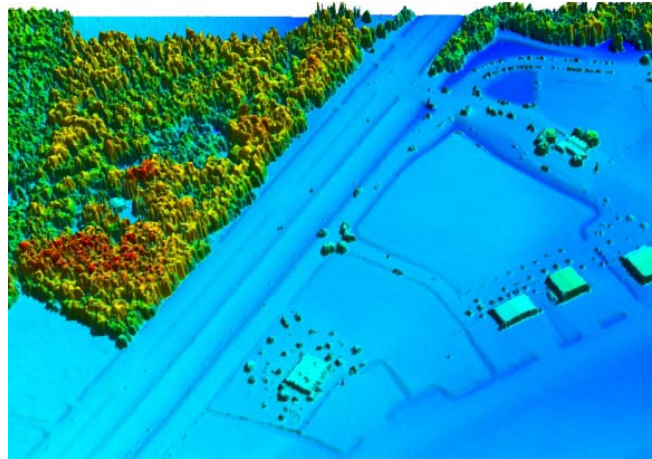
Reflektionsintensitäten

Quelle: [NGS2001]

Abbildung 71: Datenprodukte LIDAR

Wie beim Radar-Phaseninterferogramm bildet die LIDAR-Höheninformation keine Basis zur Objektextraktion von visuell zu identifizierenden Flughafenobjekten, ausgenommen Volumenobjekten mit 3-dimensionaler Ausdehnung, wie z.B. Gebäude.





Quelle: [NGS2001]

Abbildung 72: LIDAR-Höhenmodell Flughafen Gainesville Regional Airport

Abbildung 72 zeigt die detailliert Wiedergabe von Gebäuden im LIDAR-Geländemodell. Es sind jedoch keine ausreichende Information bezüglich Landebahn- und Rollwegen sowie ihren Markierungen zu erkennen, da die Objektunterscheidung keine Funktion der Höhe, sondern lediglich der spektralen Reflektionscharakteristik ist. In Lidar-Intensitätsbildern, wie z.B. in Abbildung 71 dargestellt, lassen sich dagegen einzelne Objekte auf der Landebahn deutlich voneinander unterscheiden. In der weiteren Evaluierung wird sich daher auf LIDAR-Intensitätsbilder konzentriert.

### Temporale Auflösung

Da als Sensorplattform für LIDAR fast ausschließlich Flugzeuge eingesetzt werden, ist die temporale Auflösung auftragsabhängig; eine kontinuierliche Aufnahme eines Zielortes kann nur durch regelmäßige Neubefliegungen gewährleistet werden.

### Geometrische Eigenschaften

Die auf dem Markt für unterschiedliche Einsatzzwecke angebotenen LIDAR können nach dem Messprinzip unterschieden werden in:

- Gepulste Laser
- *Continuous Wave* (CW) Laser

Gepulste Laser bieten die Möglichkeit, die erste und letzte Reflektion des ausgesandten Signals getrennt zu messen. Daher kann bei einer Messung im Wald, aufgrund der hohen Durchdringungsraten durch Laub- und Nadelwaldbestände, zwischen dem Bodenprofil (letzte Reflektion) und dem Bedeckungsprofil (erste Reflektion) unterschieden werden. Dieses Prinzip liegt beim permanent messenden *Continuous Wave* (CW) Laser nicht vor. Er ist damit ungeeignet für Waldgebiete, da er eine mittlere Höhe zwischen Waldboden und Laubfläche liefern wird.

Hinsichtlich des Scanprinzips kann zwischen Scannern mit kippenden oder rotierenden Spiegeln bzw. mehrfach nebeneinander liegenden Laserdioden, wobei jeder Diode eine bestimmte Messrichtung zugewiesen wird, differenziert werden. Je nach genutztem Verfahren unterscheidet sich die Anordnung der Reflektionspunkte an der Erdoberfläche deutlich voneinander:



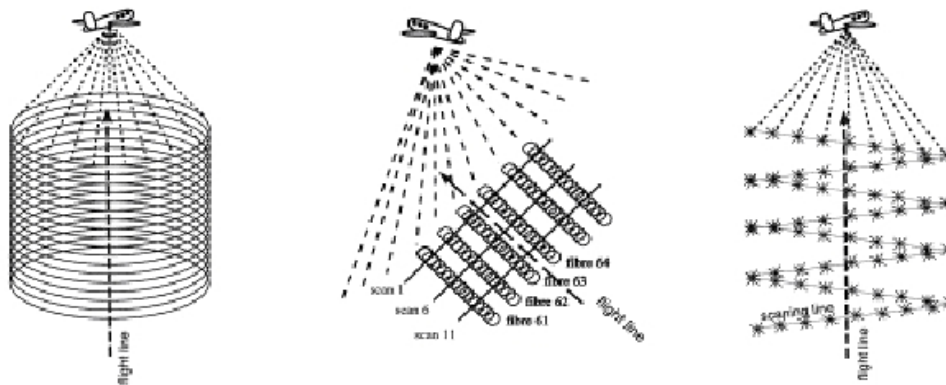


Abbildung 73: Verschiedene LIDAR-Verfahren: Rotierender Spiegel (links), nebeneinander liegende Laserdioden (Mitte) und kippender Spiegel (rechts)

Die variablen Parameter Messrate, Scanwinkel und Scanfrequenz bestimmen zusammen mit der Flughöhe über Grund, der Fluggeschwindigkeit und dem Abstand der Fluglinien die Dichte und die Verteilung der Laserpunkte auf dem Erdboden. Durch Variation der Messrate, der Parameter Scanwinkel und Streifenabstand ist die Punktdichte modifizierbar. Über die Laufzeitlänge der Laserimpulse von der Aussendung bis zum Empfang der reflektierten Signale wird die Entfernung zwischen Messsystem und Geländepunkt ermittelt und auf Datenträgern gespeichert [Lex2005]. Parallel kann die Signalstärke des reflektierten Laserstrahls aufgezeichnet werden.

#### 8.2.4.1 Arbeitsablauf zum Erstellen von Flughafendatenbanken mittels LIDAR

Der LIDAR-Prozess ist bis auf die Einmessung der Objektlage und –Information vollautomatisch.

Die folgenden 4 Arbeitsschritte müssen durchlaufen werden:

1. Akquisition des Bildmaterials des Zielgebietes
2. Pre-Processing
3. Post-Processing
4. Einmessen der 2-dimensionalen Objektlage und –Information im LIDAR-Intensitätsbild

##### 1.) Akquisition des Bildmaterials des Zielgebietes

LIDAR-Befliegungen sind tageszeit- und jahreszeitunabhängig, jedoch nur beschränkt wetterunabhängig. Voraussetzung ist, dass zwischen dem Flugzeug und der zu erfassenden Oberfläche sich keine Hindernisse z. B. in Form von Wolken oder Niederschlag befinden.

##### 2.) Pre-Processing

Im Pre-Processing werden die im Flug aufgezeichneten Laserentfernungsmessungen und der rekonstruierte Flugpfad zur Berechnung der 3D-Koordinaten jedes Laserpulses genutzt. Bei der Flugpfadrekonstruktion wird mit Hilfe einer differenziellen GPS-Berechnung aus den im Flugzeug aufgezeichneten Daten und einer synchron datenaufzeichnenden Referenzstation die exakte Position des LIDAR-Systems bestimmt. Eine Trägheitsplattform (kreiselstabilisiertes System) bestimmt und speichert die bei der Befliegung auftretenden Bewegungen um die 3 Raumachsen in Form von Winkeln, welche die Abweichung des

Flugzeugs von der Nordrichtung und der Lotrechten beschreiben. Aus den synchronisiert aufgezeichneten Daten Entfernung, Position, Orientierung sowie den Koordinaten der Referenzstation wird nach dem Flug die genaue Position und Höhe für jeden gemessenen Höhen- bzw. Intensitätspunkt berechnet.

### 3.) Post-Processing

Im Post-Processing werden die unregelmäßig verteilten Höhen- und Intensitätspunktwolken in ein gleichmäßiges Bildraster transformiert.

### 4.) Einmessen der 2-dimensionalen Objektlage und Information im Intensitätsbild

Zum visuellen Einmessen der Objektlage und –Information ist die Kenntnis der objektspezifischen Reflektionscharakteristika notwendig, da sich die Darstellung im Radar-Intensitätsbild deutlich von der natürlichen Darstellung von Objekten unterscheidet.

Zur Identifizierung müssen sich einzumessende Objekte im Radar-Intensitätsbild hinsichtlich ihrer Reflektionscharakteristik und ihrer radiometrischen Darstellung deutlich von umgebenden Objekten unterscheiden.

#### 8.2.4.2 Übersicht kommerzieller LIDAR-Fernerkundungssysteme

Die folgende Tabelle gibt eine Übersicht über die wichtigsten kommerziellen SAR-Fernerkundungssysteme:

Sensor-system	Plattform	Geometrie	Temporale Auflösung
Optech <b>ALTM 3100EA</b> [Opt2006]	Flugzeug	Kippender Spiegel	Nicht kontinuierlich (auftragsbasiert)
Optech <b>ALTM 2050</b>		Kippender Spiegel	
Leica <b>ALS50</b> [Lei2006]		Kippender Spiegel	
Riegl <b>LMS-Q560</b> [Rie2006]		Rotierender Spiegel	

Tabelle 12: Übersicht kommerzieller LIDAR-Fernerkundungssysteme

### 8.3 Nutzung von Sensorsystemen in der weiteren Untersuchung

Die Evaluierung der Verfahren der Fernerkundung hinsichtlich Vollständigkeit und Genauigkeit basiert in weiten Teilen auf Untersuchungen des Autors im Rahmen der Erstellung, Verifizierung und Aktualisierung einer Vielzahl von Flughafendatenbanken (siehe Tabelle 7). Hierbei wurden ausschließlich passive chemo-optische und elektro-optische Fernerkundungsverfahren betrachtet. In der weiteren Evaluierung werden jedoch auch Daten aktiver Sensorsysteme (SAR, LIDAR) untersucht.

Im Rahmen der Evaluierung werden gegenwärtig verfügbare Systeme in Bezug auf deren Nutzbarkeit zum Erstellen von Flughafendatenbanken hinsichtlich Vollständigkeit mittels der Parameter radiometrischer, spektraler und räumlicher Auflösung sowie Positionsgenauigkeit untersucht. Die zur Evaluierung ausgewählten Sensorsysteme decken für das jeweilige Fernerkundungsverfahren das obere Leistungsspektrum ab. Die in den Falluntersuchungen genutzten Sensorsysteme und Fallbeispiele wurden entsprechend ihres Leistungsspektrums und der Verfügbarkeit zur wissenschaftlichen Untersuchung im Rahmen der Dissertation ausgewählt:

- Chemo-optische Luftbildkameras: RMK Top 23, Wild RC20/30

Die flugzeuggestützten Luftbildkameras gehören heute zu den weltweit am weitesten verbreiteten Modellen. RMK Top 23 findet Einsatz insbesondere in der landestopographischen Vermessung, aber auch in der Luftfahrt-Hindernisvermessung.

- Elektro-optische Satellitensensoren: GeoEye IKONOS 2, GeoEye 1, DigitalGlobe Quickbird 2, Worldview 1

Diese satellitengestützte Sensorsysteme decken bezüglich ihrer räumlichen Auflösung den Bereich der höchstaflösenden Fernerkundungssensoren ab. Mit 0.4m räumlicher Auflösung bietet GeoEye 1 neben Worldview 1 die gegenwärtig höchste kommerziell verfügbare Auflösung.

- Synthetic Aperture Radar: Intermap STAR 3i

Der flugzeuggestützte Intermap STAR 3i Sensor liegt mit 1m erreichbarer Bodenauflösung im oberen Leistungsspektrum der kommerziellen SAR-Sensorsysteme.

- LIDAR: Optech ALTM 2050

Optech Inc. bedient den Grossteil des Markts für flugzeuggestützte LIDAR-Sensorsysteme. Bezüglich seines Leistungsspektrums deckt der Optech ALTM 2050 den mittleren bis oberen Bereich ab. Es existieren bereits Nachfolgemodelle mit verbessertem Leistungsspektrum, wie z.B. der Optech ALTM 3050EA, welche mangels Datenverfügbarkeit jedoch nicht evaluiert werden konnten.



## 8.4 Analyse der Vollständigkeit

Mittels Methoden der Fernerkundung können lediglich solche Objekte erfasst und extrahiert werden, welche für den spezifischen Sensor auch „sichtbar“ sind. Objekte mit fiktiver räumlicher Ausprägung (Frequency Area, Aerodrome Reference Point, Deicing Area und Construction Area) können nicht eingemessen werden. Diese Informationen liegt ausschliesslich in Aerodrome/Heliport Chart ICAO vor und muss hieraus abgeleitet werden.

Grundlage zum Gewährleisten von Vollständigkeit bei der Erstellung von Flughafendatenbanken ist die eindeutige Beschreibung der aufzunehmenden Objekte z.B. in Form eines Datenkatalogs, wie in Kapitel 6.2 beschrieben und im Rahmen von RTCA Do-272a / EURACAE ED99a dokumentiert.

Die Anordnung, Farb- und Formgebung von Verkehrsflächen sowie Verkehrsführungselementen auf Flughäfen ist durch eine Reihe von Vorschriften der ICAO standardisiert ([ICAO14\_I], [ICAO14\_II], [ICAO9157-1], [ICAO9157-2], [ICAO9157-3], [ICAO9157-4]). Daher bietet sich zum Erstellen von Flughafendatenbanken auf Fernerkundungsbasis die Nutzung automatischer bzw. halbautomatischer Objektextraktionsmethoden an, welche farblich und bezüglich der Form definierte Objekte automatisch aus einer Fernerkundungsszene extrahieren können.

Im Rahmen von Analysen von Satelliten- und Luftbildern sowie Vor-Ort-Vermessungen und Verifizierungen auf den in Tabelle 7 genannten europäischen, kanadischen, US-amerikanischen und afrikanischen Flughäfen wurden jedoch teilweise erhebliche Abweichungen der Flughafenobjekte bezüglich Form und Farbgebung von ICAO-Vorgaben (insbesondere bei Markierung von Rollwegen, Rollwegschultern sowie Stand Areas) festgestellt. Lediglich bei der Markierung von Start- und Landebahnssystemen wurden keine Abweichungen von ICAO-Richtlinien festgestellt. Durch starke Beanspruchung hervorgerufene farbliche Abnutzungserscheinungen führen hier jedoch zu starken farblichen Abweichungen von der ICAO-Vorgabe und erschweren eine automatische Objektextraktion für Flughafendatenbanken erheblich.



Verschmutzung der Landebahn-Markierung im Aufsetzbereich (Flughafen Frankfurt)



Nicht-ICAO-konforme Markierung der Rollwegschulter (Flughafen Reno)

Quelle: Eigene Grafik

Abbildung 74: Verschmutzungserscheinungen und Abweichungen von der ICAO-Norm

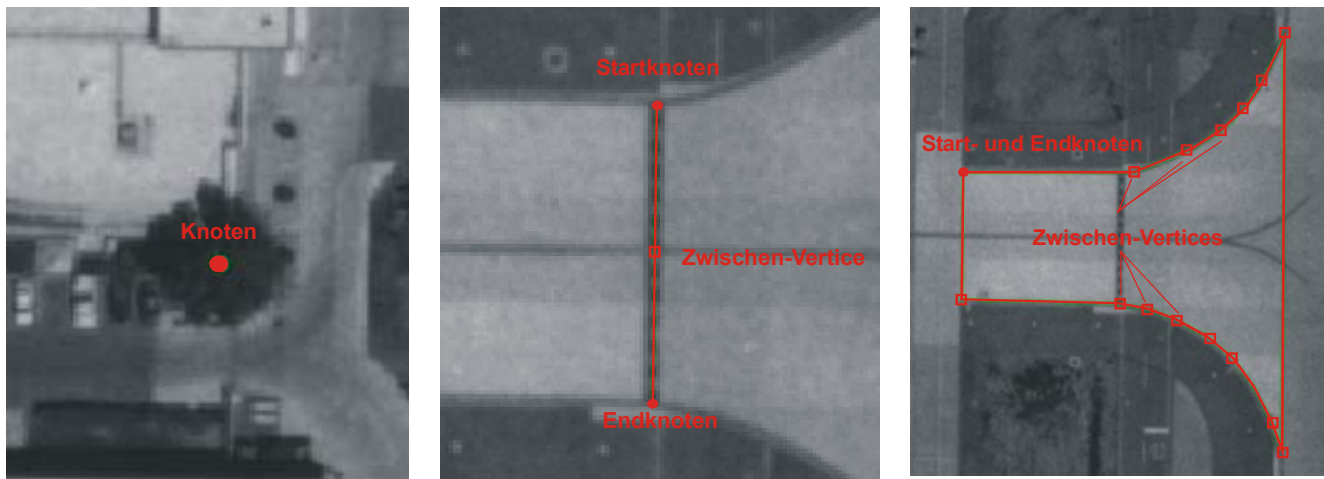
Die aufgezählten Abweichungen von der ICAO-Norm erschweren die zuverlässige voll- oder halbautomatische Extraktion von Objekten auf fernerkundlicher Bildbasis daher stark. Lediglich zur Extraktion von Landebahnobjekten wurden Verfahren zur automatischen Objektextraktion bisher erfolgreich durchgeführt [Hor2004] (siehe Kapitel 1). Daher wird in der weiteren Evaluierung auf eine Untersuchung der zu erreichenden Vollständigkeit und

Genauigkeit durch automatische und halbautomatische Extrahierungsverfahren verzichtet und der Schwerpunkt auf die visuelle Objektextraktion durch einen Operator gelegt.

Laut Datenkatalog [Do-272a] und dem Datenaustauschformat [Do291] (siehe auch Appendix A), sind den verschiedenen Objektklassen bestimmte Geometrietypen zugeordnet. Es werden lediglich einfache Geometrien (Linie, Punkt, Fläche) unterstützt.

Der Operator erfasst zur visuellen Objekteinmessung

- den Objektmittelpunkt (bei Punktgeometrien)
- die Mittellinie (bei Liniengeometrien)
- die Objektseiten (bei Polygoneometrien)



Quelle: Eigene Grafik

Abbildung 75: Extrahieren von Objekten in einer Fernerkundungsszene  
(links: Baum, definiert als Punktgeometrie, Mitte: Rollhaltelinie definiert als Linienelement, rechts: Rollwegsegment definiert als Polygoneometrie)

Hierbei werden Linien mit einem Start- und Endknoten aufgenommen. Zusätzlich Knicke in der Linienführung werden durch Zwischenvertices, die über Kanten (Edges) verbunden sind, definiert. Die Definition von Kurven durch Radien ist laut der Anforderung zur Datenaufnahme aus dem Datenkatalog für Flughafendatenbanken [Do-272a] und der Anforderung zum Austauschformat [Do291] nicht zulässig. Kreissegmente müssen daher durch Liniensegmente mit mehreren Zwischenvertices angenähert aufgenommen werden. Flächenobjekte werden durch Polygone aufgenommen, welche einen identischen Start- und Endknoten besitzen. Eckpunkte werden durch Zwischenvertices definiert.

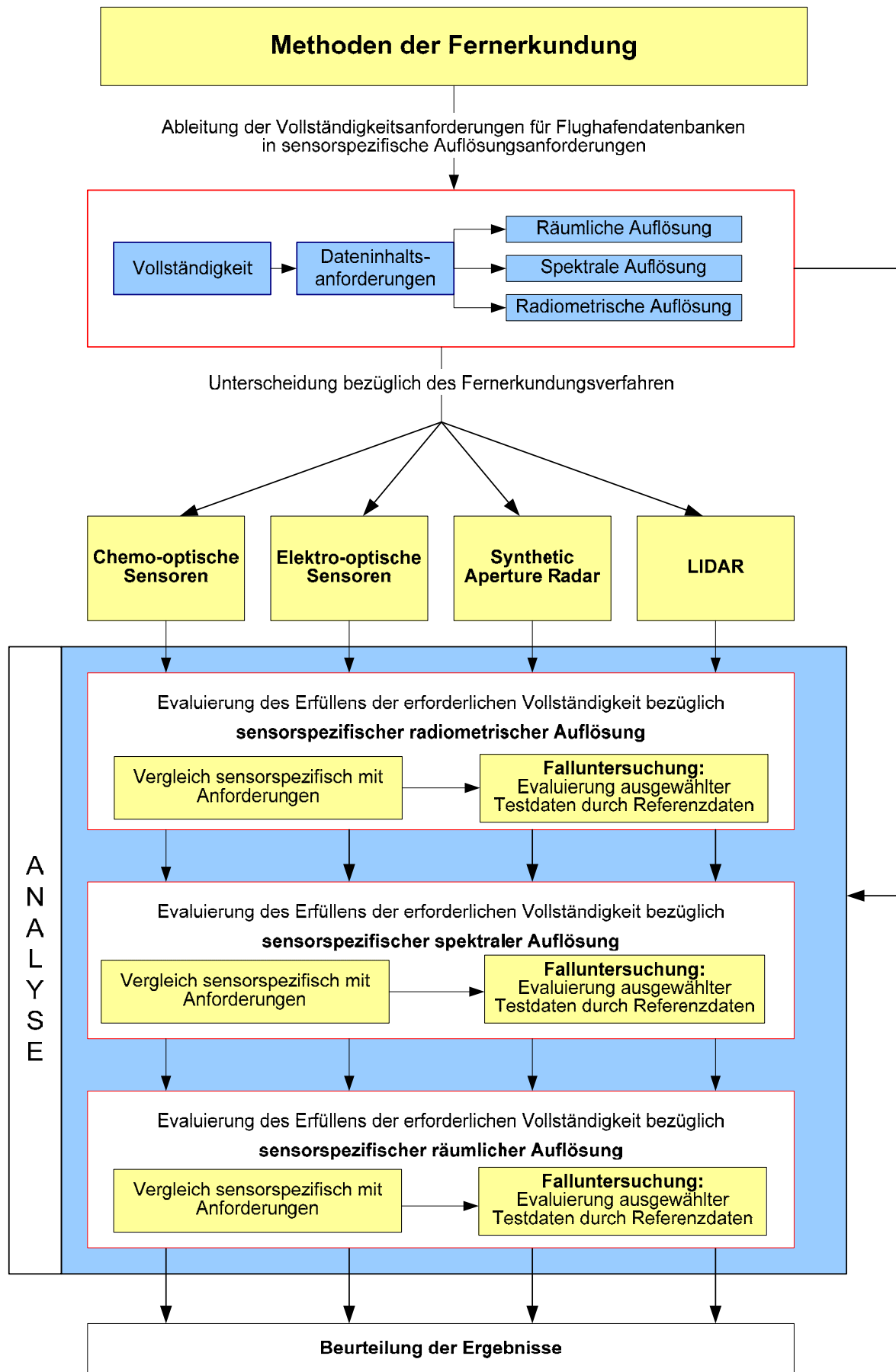
Wichtigste Grundlage zur korrekten visuellen Objekterkennung und -Einmessung ist die Übereinstimmung der zu extrahierenden Objekte in Form und Farbe mit ihrer natürlichen Erscheinung. Weicht die Darstellungen ab, wie z.B. bei aktiven Sensoren (Radar- und LIDAR), aber auch bei panchromatischen Darstellungen von passiven Sensoren, muss der Zusammenhang zwischen Darstellung im Bild und in Realität durch den Operator erst erlernt werden.

### 8.4.1 Vorgehensweise

Zur Evaluierung der Nutzbarkeit von Fernerkundungsmethoden zur Erstellung von Flughafendaten unter Wahrung der definierten Vollständigkeit werden zunächst Anforderungen zur visuellen Extraktion an radiometrische, spektrale und räumliche Auflösung aus der realen Form, Größe und Farbe der in Appendix A aufgeführten Objekte

einer Flughafendatenbank abgeleitet. Diese Anforderungen werden mit den Leistungsspektren der oben aufgeführten Fernerkundungssysteme zunächst im Allgemeinen untersucht und die Ergebnisse mittels ausgewählter Testdaten in Falluntersuchungen evaluiert. Abschließend werden die Produktspezifikationen gängiger Fernerkundungs-Sensorsysteme mit den abgeleiteten Anforderungen verglichen und die Sensoren hinsichtlich des Erfüllens und Nichterfüllens der Anforderungen eingeordnet.

Abschließend werden die Ergebnisse bezüglich der einzelnen Sensortypen miteinander in Bezug gesetzt.



Quelle: Eigene Grafik

Abbildung 76: Vorgehensweise zur Evaluierung der Vollständigkeit für Fernerkundungssensoren



## 8.4.2 Ableitung der Anforderungen

Zur Gewährleistung der Vollständigkeit von Flughafendatenbanken im Rahmen einer visuellen, operatorgestützten Objektextraktion aus einer Fernerkundungsszene muss diese bestimmte Anforderungen bezüglich der Darstellung von Objekten erfüllen, welche durch die radiometrische, spektrale und räumliche Auflösung des Fernerkundungssensors beschrieben werden kann (siehe Kapitel 8.1.1). Die radiometrische, räumliche und spektrale Anforderung stehen untereinander in enger Wechselwirkung und leiten sich aus der räumlichen Charakteristik der zu extrahierenden Objekte (Größe, Form, Farbe), deren visuellen Wahrnehmung durch den Menschen sowie aus Umgebungsvariablen, wie z.B. der vorherrschenden Beleuchtungssituation ab.

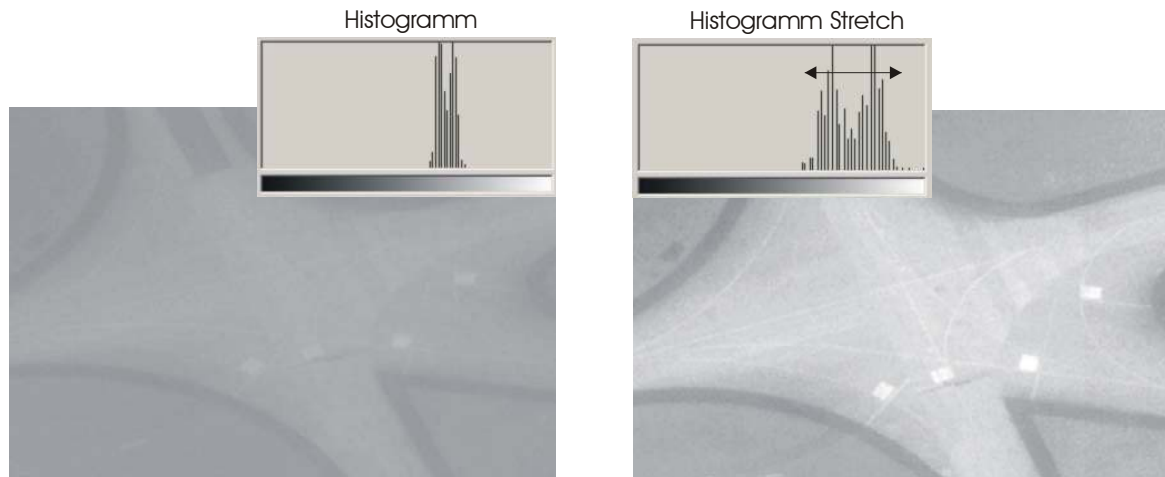
### 8.4.2.1 Ableitung der Anforderungen an radiometrische Auflösung

Die radiometrische Auflösung eines Fernerkundungssensors beschreibt dessen Vermögen, verschiedene Reflektionsintensitäten zu unterscheiden und aufzeichnen zu können. Höhere radiometrische Auflösung eines Sensors bedeutet höheren Informationsgehalt der Fernerkundungsszene. Dies kann insbesondere bei schlechten Beleuchtungsverhältnissen oder geringen spektralen Unterschieden zweier benachbarter Objekte entscheidend zur korrekten Identifizierung und Einmessung von Objekten in der Fernerkundungsszene beitragen.

Da das menschliche Auge deutlich mehr Farbtöne als Graustufen unterscheiden kann, kann der Mensch auf einem Farbbild Objekte mit geringen Helligkeitsunterschieden besser voneinander unterscheiden als auf einem Graustufenbild [Lil1994]. Geringere radiometrische Auflösung kann daher im gewissen Rahmen durch höhere spektrale Auflösung, insbesondere bei Darstellung in verschiedenen Farbtönen, ausgeglichen werden. Daher wird im Folgenden die Anforderung an radiometrische Auflösung in Bezug zur spektralen Auflösung gesetzt.

Insbesondere bei Graustufenbildern (auf panchromatischen Luft- und Satellitenbildern sowie auf SAR- und LIDAR-Intensitätsbildern) von Sensoren mit geringer radiometrischer Auflösung können Objekte teilweise nicht eingemessen bzw. korrekt klassifiziert werden, wenn spektrale Unterschiede zwischen benachbarten Objekten nicht unterschieden werden und diese Objekte ineinander „verschwimmen“. Ebenso kann das gesamte Informationspotential von Graustufen-Fernerkundungsszenen mit hoher radiometrischer Auflösung bei schlechtem Kontrastverhältnis innerhalb des Bildes aufgrund der limitierten radiometrischen Auflösung der Bildschirmdarstellung oftmals nicht dargestellt werden.

Um die Einschränkungen der Bildschirmdarstellung und die geringe Fähigkeit von Menschen, Graustufen voneinander unterscheiden zu können, zu überkommen, kann bei Bildern mit hoher radiometrischer Auflösung jedoch mittels gezielter lokaler radiometrischer Anpassungen „versteckte“ Information sichtbar gemacht werden:



#### Ohne radiometrische Anpassung.

Der gesamte Informationsgehalt des Bildes befindet sich auf einem sehr schmalen Band des gesamten Spektralbereiches (siehe Histogramm).

#### Mit radiometrischer Anpassung.

Der Informationsgehalt des Bildes wurde durch einen Histogramm-Stretch auf einen breiteren Spektralbereich verteilt, d.h. die spektralen Unterschiede erhöht. Hierdurch werden vorher „versteckte“ Informationen wie z.B. Rollführungslinien dem menschlichen Auge sichtbar gemacht.

Quelle: Eigene Grafik

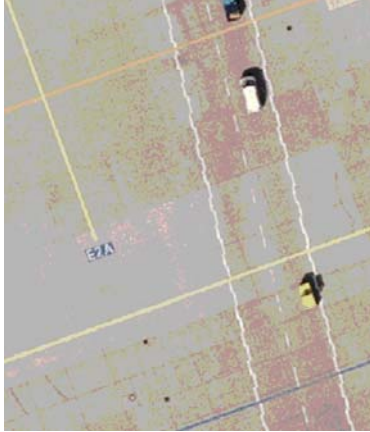
Abbildung 77: Lokale radiometrische Anpassung zum Sichtbarmachen von „verstecktem“ Informationsgehalt (EDDF, Frankfurt, Quickbird, 11 bit radiometrische Auflösung)

Obwohl das menschliche Auge nur weit weniger als 256 Helligkeitsstufen voneinander unterscheiden kann [Kra1994], macht insbesondere unter Ausnutzung von Techniken zur lokalen radiometrischen Anpassung für Graustufenbilder eine radiometrische Auflösung, welche die des menschlichen Auges überschreitet, Sinn. Im Rahmen der vom Autor erstellten Flughafendatenbanken (siehe Tabelle 7) hat sich für Graustufenbilder eine radiometrische Auflösung von 256 Helligkeitsstufen (digital durch 8 bit abgebildet) wegen der stellenweise sehr geringen Farb- und damit Helligkeitsunterschiede verschiedener Objekte in der panchromatischen Abbildung als zu gering erwiesen. (z.B. weiße Landebahnmarkierung auf hellgrauem Betonuntergrund), obwohl sie bereits das Auflösungsvermögen des menschlichen Auges überschreitet. Kommerzielle Sensoren nutzen in der Regel 2048 Helligkeitsstufen (11 bit). Diese radiometrische Auflösung erwies sich als ausreichend, um mittels Techniken zur lokalen radiometrischen Anpassung auch Objekte mit ähnlicher Farb- und Helligkeitscharakteristik noch unterscheiden zu können (siehe Abbildung 51 und Abbildung 73).

Um die benötigte radiometrische Auflösung für Sensoren, welche den sichtbaren Spektralbereiches als Farbbild abbilden, festzustellen, wurde die radiometrische Auflösung eines Farbluftbildes der Flughäfen Frankfurt und Reno mit ca. 16.7 Mio Farben mittels ERDAS Imagine 8.0 sukzessive verringert. Die Abstufung der radiometrischen Auflösung beruht auf der Darstellung im RGB-Farbmodell durch additives Mischen der drei Farbkanäle rot, grün und blau. Für jeden Farbkanal wurde sukzessive die Anzahl der Farben um eine Zweierpotenz verringert (256, 128, 64, 32, 16, 8 Farben pro Kanal). In der resultierenden Abbildung wurde untersucht, inwieweit Objekte noch eindeutig zu unterscheiden bzw. zu identifizieren sind. Hierbei wurden drei Fälle betrachtet: Ein Fall mit spektral stärker differierenden (verschiedenfarbigen) Objekten, ein Fall mit weniger differierenden Objekten, und ein Fall mit fast gleichfarbigen Objekten, welche es zu unterscheiden galt.

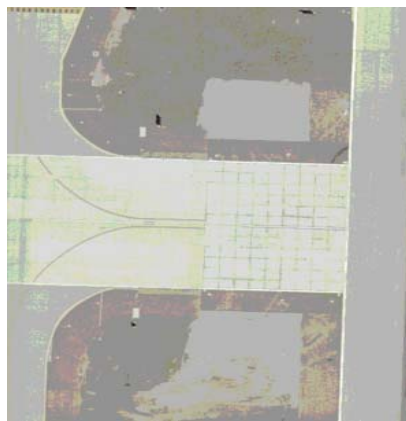
Objekte mit starken spektralen Differenzen:

Gelbe, rote blaue Mittellinie auf Betonuntergrund



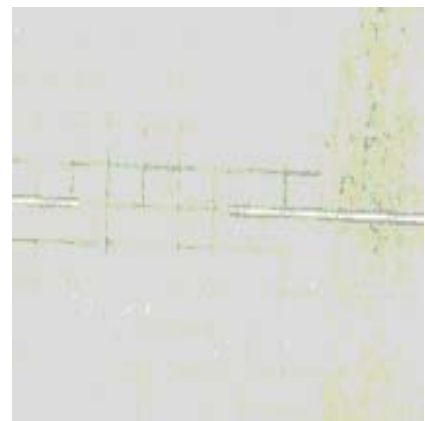
Objekte mit geringeren spektralen Differenzen Objekten:

Gelbe Mittellinie auf Betonuntergrund



Objekte nahezu gleicher Spektraler Charakteristik:

Weisse Mittellinie auf hellem Betonuntergrund



512 Farben (8 Farben pro Kanal =RGB 9bit)



4096 Farben (16 Farben pro Kanal =RGB 12 bit)



Originalbild: 16.7 Mio Farben (256 Farben pro Kanal = RGB 24bit)

Quelle: Eigene Grafik

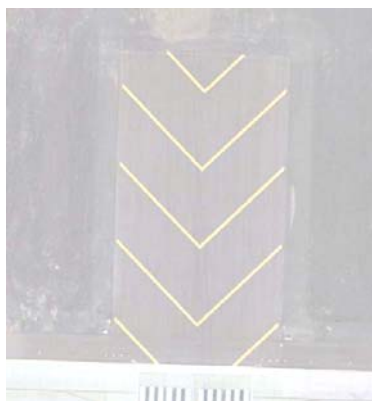
Abbildung 78: Darstellung einer Fernerkundungsszene des sichtbaren Spektralbereiches als Farbbild bei verschiedener radiometrischer Auflösung

Wie in Abbildung 78 sichtbar, ist eine radiometrische Auflösung von 512 Farben nicht ausreichend, um Objekte noch ausreichend voneinander unterscheiden bzw. identifizieren zu können, insbesondere bei Objekten nahezu gleicher spektraler Charakteristik wie die Landebahnmarkierung auf hellem Betonuntergrund (oben rechts). Auch wird die Einfärbung von Objekten nicht mehr in ihrer natürlichen Darstellung abgebildet. Ab 4096 Farbstufen ist jedoch eine ausreichende Unterscheidung und Identifizierung von Objekten auch bei geringen spektralen Differenzen möglich. Höhere radiometrische Auflösung trägt nicht wesentlich zur besseren Objektunterscheidung auf Echtfarbenbildern bei, wie aus dem Vergleich der Abbildungen mit 4096 Farbstufen mit den Abbildungen mit der vollen Auflösung der Szene mit 16.7 Mio Farben sichtbar wird. Die benötigte Auflösung für Farabbildungen des sichtbaren Spektralbereiches wird daher mit 4096 Farbstufen festgelegt.

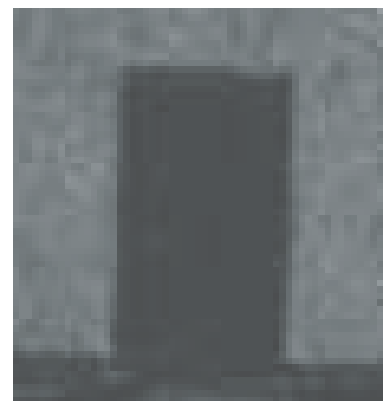
Für aktive Fernerkundungssensoren, deren spektrale Auflösung außerhalb des Bereiches des sichtbaren Lichtes liegt (SAR- und LIDAR-Intensitätsbild), ist die benötigte radiometrische Auflösung abhängig von der Reflektionscharakteristik der zu extrahierenden Objekte in Bezug auf den Spektralbereich der Strahlung. Objekte, welche im Bereich des sichtbaren Lichts mit ähnlicher Charakteristik reflektieren und daher in einer Fernerkundungsszene nicht voneinander abzugrenzen sind, können völlig unterschiedliche Reflektionscharakteristiken bzgl. des Spektralbereichs eines aktiven Sensors besitzen, und sich daher auch bei geringer radiometrischer Auflösung des Sensors ausreichend voneinander zu unterscheiden:



LIDAR 1st Impulse Intensitätenbild



RGB-Echtfarbenbild



SAR-Intensitätenbild

Quelle: Eigene Grafik

Abbildung 79: Abbildung eines Blastpads mit Markierung im LIDAR-Intensitätsbild, Luftbild und SAR-Intensitätsbild (Flughafen Reno)

In Abbildung 79 ist deutlich zu erkennen, dass sich die asphaltierte Fläche des Blastpads im Echtfarbenbild (Mitte) spektral kaum von der umgebenden erdigen Oberfläche unterscheidet, im LIDAR-Intensitätsbild (links) etwas deutlicher. In der Darstellung des SAR-Intensitätsbildes (rechts) ist die asphaltierte Oberfläche klar von der Umgebung abgegrenzt (schwarzer Untergrund gegenüber hellgrauem Untergrund). Zur Abgrenzung des Blastpads von seiner Umgebung im Echtfarbenbild wäre eine deutlich höhere radiometrische Auflösung notwendig als auf dem SAR-Intensitätsbild, welches eine klare Abgrenzung schon bei geringer radiometrischer Auflösung zulässt. Die gelben Markierungspfeile auf dem Blastpad werden jedoch auf dem SAR-Intensitätsbild (rechts) nicht abgebildet, da sich die Reflektionscharakteristik des Kunststoffes, der zur Markierung genutzt wurde, hinsichtlich der Wellenlänge der Radarstrahlung nicht ausreichend von der Reflektionscharakteristik des Asphalts des Blastpads unterscheidet bzw. die radiometrische Auflösung des Sensors zur Unterscheidung der eventuell existierenden feinen Unterschiede in der Reflektionscharakteristik nicht ausreichend ist. Die radiometrische Auflösung von SAR- und LIDAR-Intensitätsbildern muss daher an die Reflektionscharakteristik der zu extrahierenden Objekte angepasst sein. Um diese Anforderung für die Extraktion von Flughafendatenbanken

im Einzelnen definieren zu können, muss das Reflektionsverhalten der zu extrahierenden Elemente in Bezug auf die spektrale Auflösung im Detail untersucht werden. Exemplarisch sei in Tabelle 13 die Reflektionsintensität von verschiedenen Materialien in Bezug zur Einstrahlungsintensität für ein LIDAR-Sensor, der im nahen Infrarotbereich (0.9  $\mu\text{m}$ ) arbeitet dargestellt:

Material	Reflektionsintensität [%]
Weißes Papier	Bis zu 100
Schnee	80-90
Weißer Mauer	85
Kalkstein, Ton	Bis zu 75
Laubbäume	ca. 60
Sand (trocken)	50-60
Sand (nass)	ca. 40
Glatter Beton	24
Asphalt mit Steinbemischungen	17
Lava	8
Schwarze Gummibeschichtungen	2

Tabelle 13: Reflektivitäten eines 0.9  $\mu\text{m}$  (Nahes Infrarot) LIDAR [Son2002]

Hieraus kann abgeleitet werden, dass im spezifischen Fall eines 0.9  $\mu\text{m}$  LIDAR Sensors für die beiden dominierenden Oberflächenmaterialien im Flughafenbereich, Beton und Asphalt, wegen des geringen Unterschiedes in der Reflektionsintensität von 7% eine ausreichend hohe radiometrische Auflösung des Sensors erforderlich ist, damit sich beide Materialien unterscheiden lassen. Aufgrund der hohen Bandbreite der Oberflächenmaterialien im Flughafenbereich (Metalle, Beton, Asphalt, Kunststoffe, natürlicher Bewuchs) und verfügbaren spektralen Auflösungen für LIDAR und SAR (verschiedene Wellenlängen) kann an dieser Stelle jedoch keine detaillierte Untersuchung zum Reflektionsverhalten jedes Materials in Bezug auf die verschiedenen LIDAR- und Radar-Wellenlängen zur Ableitung der benötigten radiometrischen Auflösung durchgeführt werden. Dies würde den Rahmen der Arbeit sprengen. Zur Ableitung der benötigten radiometrischen Auflösung für LIDAR und SAR wird sich in diesem Rahmen an die Betrachtungen zur radiometrischen Auflösung für panchromatische Bilder des sichtbaren Bereiches angelehnt, da deren gemeinsames Merkmal die Darstellung des Bildes in Graustufen ist. Analog sollte die radiometrische Auflösung mindestens 11 bit/2048 Helligkeitsstufen betragen, um eine möglichst hohe Informationsdichte zu gewährleisten.

Im Folgenden sind die abgeleiteten Anforderungen an die radiometrische Auflösung von Fernerkundungssensoren aufgeführt:

Spektralbereich	Anforderung radiometrische Auflösung	Ratio
<b>Panchromatisch</b> (Graustufen, sichtbares Licht)	Mind. 2048 Helligkeitsstufen (11bit)	Ausreichende Unterscheidung und korrektes Klassifizieren von Objekten mit geringen Unterschieden in der spektralen Reflektionscharakteristik
<b>Sichtbares Licht</b>	Mind. 4096 Farbstufen (RGB 12 bit)	
<b>Außerhalb des sichtbaren Lichts</b> (SAR- und LIDAR-Intensitäten)	Mind. 2048 Helligkeitsstufen (11bit)	

Tabelle 14: Anforderung an die radiometrische Auflösung von Fernerkundungssensoren

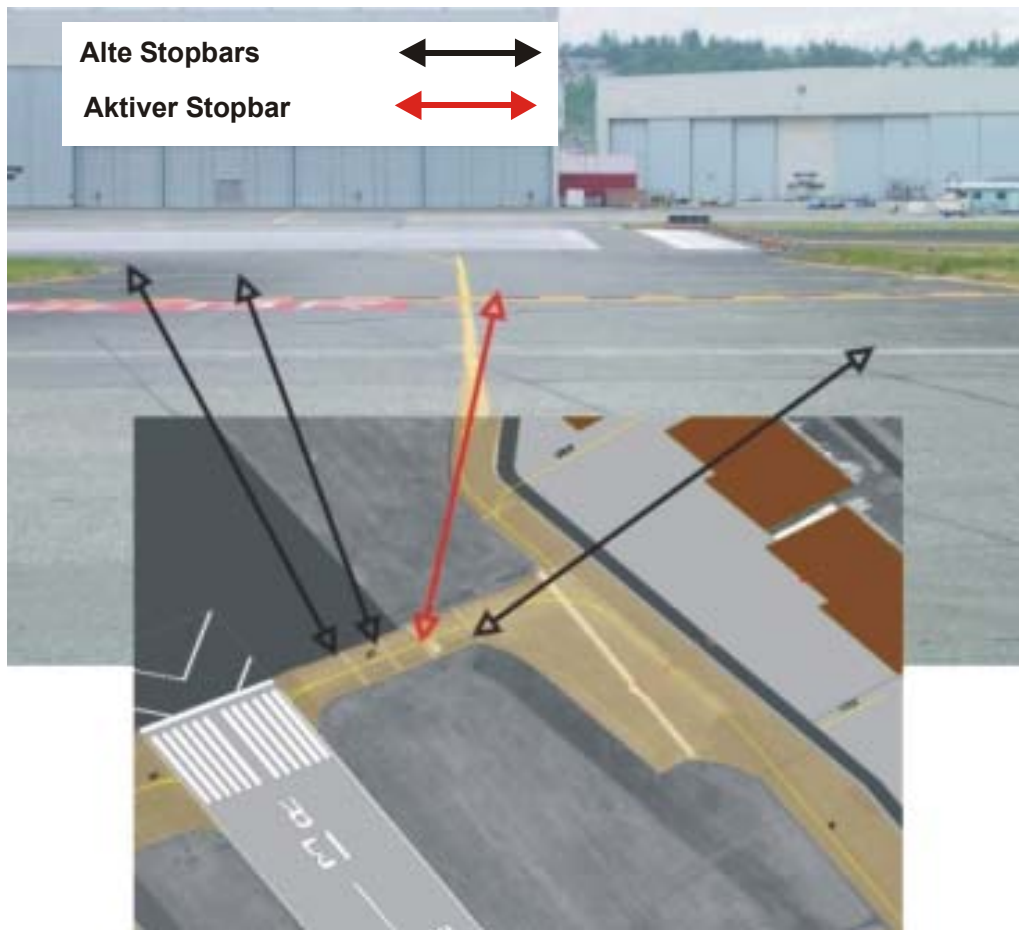
#### 8.4.2.2 Ableiten der Anforderungen an spektrale Auflösung

Als These wird zunächst angenommen, dass die Fähigkeit zum Identifizieren und korrekten Klassifizieren von Objekten in einer Fernerkundungsszene wesentlich von der farblichen Übereinstimmung des Objektes im Bild mit der visuellen Wahrnehmung des Objektes durch den Menschen in der Realität abhängt. Die spektrale Auflösung eines Sensors müsste daher im Idealfall im Bereich des sichtbaren Lichtes liegen und würde eine Darstellung als Echtfarbenbild erlauben. Eine Abbildung des sichtbaren Spektralbereich durch panchromatische Abbildungen könnte laut dieser These ebenso wie Intensitätsbilder von aktiven Sensoren wegen der unnatürlichen Darstellung keine korrekte Identifizierung und Klassifizierung des Objektes gewährleisten.

Diese These wurde durch Ergebnisse der Objektextraktion aus panchromatischen Satellitenbildern belegt. Obwohl in dem panchromatischen Bild Objekthelligkeiten ähnlich wie im Echtfarbenbild dargestellt wurden, wurden wegen des limitierten Unterscheidungsvermögens des menschlichen Auges bezüglich Graustufen Objekte mit ähnlicher spektraler Charakteristik, jedoch unterschiedlicher Einfärbung im panchromatischen Bild nicht voneinander unterschieden und falsch klassifiziert:

Nach ICAO Annex 14 [ICAO14] sowie ICAO Doc 9157, Part 1-4 [ICAO9157\_1 bis ICAO9157\_4] muss auf Flughäfen die Farbe gelb für Rollleitlinien und Haltelinien benutzt werden, während weiss für Rollwegseitenmarkierungen, Fahrstrassen sowie für alle Markierungen auf der Landebahn benutzt wird. Auf dem Flughafen Boeing Fields wurden gelbe Haltelinien vor der Landebahn durch den Flughafenbetreiber nach hinten verlegt. Hierzu wurden alte Haltelinien grau übermalt und weiter hinten neue gelb aufgebracht. Bei der Objektextraktion aus einem panchromatischen Graustufenbild war der spektrale Unterschied zwischen den alten, grau übermalten und den gelben, aktiven Haltelinien im Graustufenbild so gering, dass der Operator im Graustufenbild gelbe und hellgraue Haltelinien in der Graustufendarstellung nicht voneinander unterscheiden konnte. Es kam zu Fehlidentifizierungen:

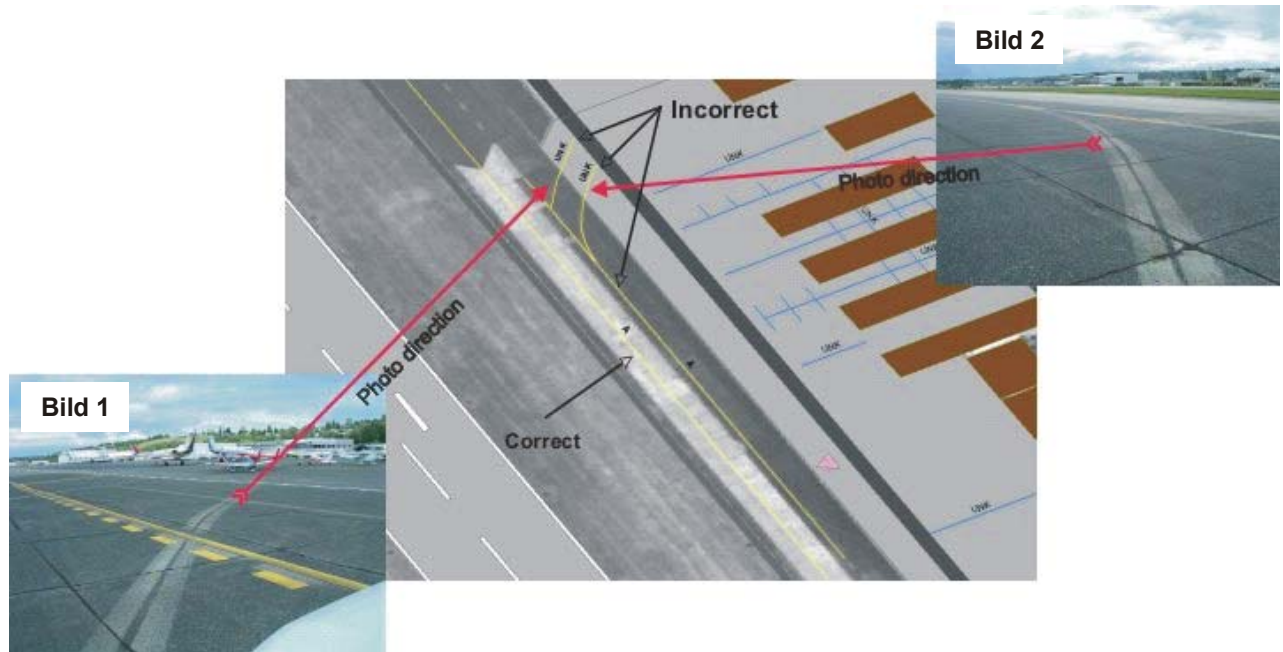




Quelle: Eigene Grafik

Abbildung 80: Fehlidentifizierung von Stopbars bei Nutzung von panchromatischen Bildern (oben: Schrägaufnahme, Farbe, unten: panchromatische Satellitenbildaufnahme mit überlagerter Flughafendatenbank). Flughafen Boeing Fields KBFI.

Ein ähnlicher Fehler unterlief bei der Objektextraktion von Rollführungslinien. Hier wurden nicht mehr genutzte Rollführungslinien grau übermalt; wegen ungenügender spektraler Unterscheidung im panchromatischen Bild jedoch als aktive Rollführungslinien identifiziert und in die Flughafendatenbank aufgenommen.



Quelle: Eigene Grafik

Abbildung 81: Fehlidentifizierung von Rollführungslinien bei Nutzung von panchromatischen Bildern (oben: Schrägaufnahme, Farbe, unten: panchromatische Satellitenbilddaufnahme mit überlagerter Flughafendatenbank) Flughafen Boeing Fields KBFI.

Insbesondere wegen der sicherheitskritischen Bedeutung von verschiedenfarbigen Rollführungs- und Leitlinien zeigen obige Beispiele, dass die spektrale Auflösung von Fernerkundungsszenen die natürliche Farbdarstellung von Objekten unterstützen muss, um deren korrekte Identifizierung und Klassifizierung zu gewährleisten. Die Anforderung an die spektrale Auflösung eines Fernerkundungssensors wird daher als Abbildung des sichtbaren Spektralbereiches in Echtfarben definiert. Hierdurch wird die Wahrscheinlichkeit von Fehlidentifizierungen bzw. Fehlklassifizierungen der zu extrahierenden Objekte verringert.

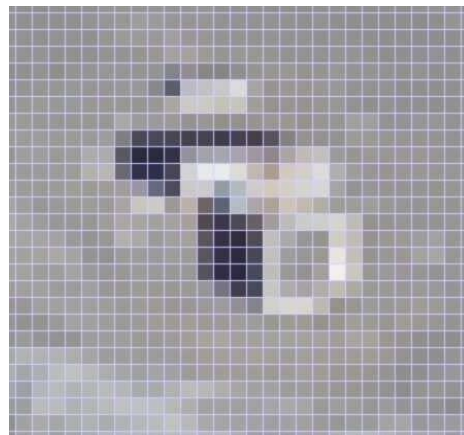
#### 8.4.2.3 Ableiten der Anforderungen an räumliche Auflösung

Innerhalb eines Bildelements wird immer nur ein Mischspektrum der Objektfarben abgebildet, welche an der Pixelfläche beteiligt sind, so dass lediglich spektral dominante Objekte in ihrer geometrischen Kombination von Pixelgruppen ein Objekt von der Umgebung differenzierbar machen.





Originalbild: Gebäudegruppierung auf Grassoherfläche



Mischpixel: Zusammenfassung von jeweils 100 Pixeln des Originalbildes zu einem Pixel. Trotz Mittelung der Farbwerte hebt sich die Gebäudegruppierung insbesondere wegen des kontrastreichen Schattenwurfs noch dominant von der umgebenden Erdoberfläche ab.

Quelle: Eigene Grafik

Abbildung 82: Abbildung eines spektral dominanten Objekts in einer Mischpixelabbildung

Ist die Oberfläche des Objektes kleiner als die Pixelauflösung des Sensors, wird das Objekt nur dann (in so genannten Mischpixeln) abgebildet, wenn es außergewöhnlich hohen Kontrastreichtum in Hinsicht auf seine Umgebung besitzt und somit den Farbwert eines Pixels deutlich beeinflusst (es kommt zur Mischpixelbildung). In Mischpixeln können Objekte mit stark unterschiedlicher Helligkeit bzw. starken Farbunterschieden auch dann noch identifiziert werden, wenn die räumliche Auflösung des Sensors die Größe der Objektoberfläche deutlich überschreitet.

Zusätzlich spielen auch zustande kommende Muster eine Rolle für die Identifizierung von Objekten, deren Oberflächengröße unterhalb der räumlichen Auflösung liegt, insbesondere bei linienhaften Strukturen. Helle Linienstrukturen sind bei starkem Kontrast zur Umgebung auch dann noch gut zu erkennen, wenn ihre Breite weit unterhalb der räumlichen Auflösung des Sensors liegt (siehe Abbildung 83).

Die erforderliche räumliche Auflösung zum Identifizieren und Einmessen von Objekten hängt demnach entscheidend von der Form und Oberflächengröße des Objektes und der Stärke des Kontrasts in Hinsicht auf seine Umgebung ab. Da die Stärke des Kontrastes zur Umgebung zum einen in beliebig vielen Variationen vorliegen kann (z.B. in Abhängigkeit von der Sonneneinstrahlung, Bewölkungsgrad, etc.), zum anderen auch wesentlich durch die radiometrische und spektrale Auflösung der Fernerkundungsszene gesteuert wird, soll dieser Aspekt zur Ableitung der Anforderung an räumliche Auflösung im weiteren nicht betrachtet werden. Die minimal erforderliche räumliche Auflösung wird daher im folgenden in Bezug zur Form und geringsten Oberfläche eines für eine Flughafendatenbank zu erfassenden Objektes gesetzt. Um formabhängige Darstellungs- bzw. Identifizierungsunterschiede zu berücksichtigen, wurden Objekte einer Flughafendatenbank zunächst entsprechend ihrer geometrischen Ausprägung in drei Gruppen (linienhafte Objekte, flächenhafte Objekte und punkthafte Objekte) kategorisiert. Im nächsten Schritt wurde für jede Kategorie das Element der Flughafendatenbank mit der geringsten Oberfläche isoliert.

Linienhafte Objekte besitzen eine deutlich längere Längs- als Seitenausdehnung. Die Richtung der geringeren Ausdehnung, also die Breite des linienhaften Objekts, ist entscheidend zum Ableiten der benötigten räumlichen Auflösung. Flächenhafte Objekte besitzen ein ausgeglicheneres Längen/Breitenverhältnis; auch hier ist die Richtung der geringeren Ausdehnung entscheidend zur Ableitung der benötigten räumlichen Auflösung..

Punkthafte Objekte besitzen ein nahezu identisches Längen/Breitenverhältnis (quadratisch) oder sind in ihrer realen Erscheinung rund.

In Tabelle 15 sind die Flughafendatenbank-Objekte mit der jeweils geringsten Oberfläche/Ausdehnung für jede Geometriegruppe (punkthaft, linienhaft, flächenhaft) hervorgehoben. Länge und Breite von Rollwegen, Rollführungslinien und Landebahnen sowie deren Markierungen sind im Rahmen von ICAO Annex 14 [ICAO14] sowie ICAO Doc 9157, Part 1-4 [ICAO9157\_1 bis ICAO9157\_4] definiert. Im folgenden werden basierend auf den Gestaltungsvorgaben der ICAO die Objekte der Flughafendatenbank mit der geringsten Oberfläche isoliert, um hierauf basierend die Anforderung an die räumliche Auflösung abzuleiten. Hierbei wird nur diejenige Oberflächengröße/Ausdehnung eines Objektes berücksichtigt, die laut Vorschrift ICAO unter verschiedenen operationellen Bedingungen die geringste ist. So ist für eine Runway-Centerline eine Breite von 0.3m bei Non-Precision-Approach Operations und 0.45m bei CAT I- und 0.9m bei CAT II/III Operations vorgeschrieben. In diesem Fall wird als geringste Breite für eine Runway-Centerline 0.3 m angenommen.

Lagen keine Vorgaben bezüglich der erforderlichen Oberflächengröße/Ausdehnung seitens ICAO vor, wurden Erfahrungswerte aus der Erstellung, Verifizierung und Aktualisierung von 22 Flughafendatenbanken herangezogen (siehe Tabelle 7). In Tabelle 15 sind die Objekte mit der geringsten Oberfläche aus der Gesamtheit aller Flughafendatenbankobjekte hervorgehoben und deren geringste Ausdehnung aufgeführt:

Geometrische Ausprägung	Flughafendatenbank-Objekt	Geringste Ausdehnung	Quelle
Flächenhaft	Runway Element	18m	[ICAO 14]
	Runway Displaced Area	18 m	[ICAO 14]
	Runway Intersection	18m	[ICAO 14]
	Runway marking	0.3 m	[ICAO 14]
	Runway shoulder	> 7.5m	[ICAO14] berechnet
	Stopway	> 18m	[ICAO 14]
	FATO	> 15m	[ICAO14] berechnet
	TLOF	> 15m	[ICAO14] berechnet
	Taxiway Element	> 7.5m	[ICAO 14]
	Taxiway Shoulder	> 5m	[ICAO14] berechnet
	Frequency area	> 500m	Erfahrungswert
	Apron	> 50m	Erfahrungswert
	Parking Stand Area	> 10m	Erfahrungswert
	Deicing Area	> 7.5m	[ICAO 14]
	Vertical Polygon Object	> 2m	Erfahrungswert
	Service Road	> 3 m	Erfahrungswert
	Construction Area	> 2m	Erfahrungswert
Linienhaft	(Runway) Painted Centerline	0.3m	[ICAO 14]
	LAHSO	> 1m	Erfahrungswert
	Arrest Gear Location	> 1m	Erfahrungswert
	Taxiway Guidance Line	0.15m	[ICAO 14]
	Taxiway Intersection Marking	0.3m	[ICAO 14]

Geometrische Ausprägung	Flughafendatenbank-Objekt	Geringste Ausdehnung	Quelle
	Taxiway Holding Position	1.5m	[ICAO 14]
	Runway Exit Line	0.15m	[ICAO 14]
	Stand Guidance Taxiline	0.15m	[ICAO 14]
	Vertical Line Object	> 0.3m	Erfahrungswert
	Parking Stand Location	0.4m	Erfahrungswert
Punkthaft	Runway Threshold	> 0.05m	Erfahrungswert
	Helipad Threshold	> 0.05m	Erfahrungswert
	Vertical Point Object	> 0.3m	Erfahrungswert

Tabelle 15: Definierte minimale Ausdehnung für Objekte einer Flughafendatenbank

*Anmerkung: Threshold-Objekte wurden nicht berücksichtigt, da deren Lageinformation mit der erforderlichen Genauigkeit in nationalen AIPs publiziert ist und eine visuelle Objektextraktion aus der Fernerkundungsszene wegen der geringen Ausdehnung von Threshold-Vermessungsmarken von teilweise weniger als 5 cm nicht möglich ist. Die Berücksichtigung der Threshold-Objekte würde die Gesamtanforderungen an räumliche Auflösung verfälschen.*

Um die minimal benötigte räumliche Auflösung herzuleiten, wurde die Abbildung der ausgewählten Objekte mit minimaler Fläche bei verschiedenen räumlichen Auflösungen in einer Fernerkundungsszene untersucht. Die hierzu benutzte Bildbasis ist ein Echtfarben-Luftbild des Flughafens Reno, Nevada aus dem Jahre 2002 mit einer räumlichen Auflösung von 12.5 cm. Um verschiedene räumliche Auflösungen zu simulieren, wurde die räumliche Auflösung des Originalbildes schrittweise unter Nutzung eines Nearest-Neighbor Resampling-Algorithmus in ERDAS-Imagine 8.0 verringert. Bei der Auswahl der Objekte auf dem Luftbild wurde darauf geachtet, dass nicht der „Idealfall“ mit größtmöglichem Kontrast zur Umgebung, sondern der Normalfall mit mittlerem Kontrast zur Umgebung betrachtet wird. So ist der Fall einer hellen Rollführungslinie auf dunklem Untergrund zur Objektidentifizierung deutlich unkritischer (d.h. die Abbildung der Rollführungslinie in Mischpixeln ist auch bei geringer räumlicher Auflösung sichergestellt), da hier die spektrale Differenz und dadurch der Kontrast der beteiligten Objekte größer ist, als bei einer hellen Rollführungslinie auf hellem Untergrund mit geringer spektraler Differenz.

#### **Darstellung von linienhaften Objekten (Rollführungslinie) bei verschiedenen räumlichen Auflösungen**

Die erforderliche räumliche Auflösung zum Extrahieren von linienhaften Flughafendatenbankobjekten wird durch die geringste Ausdehnung von 0.15m für die Objekte Rollführungslinie, *Runway Exit Line* und *Stand Guidance Taxiline* nach [ICAO14] bestimmt. Alle drei Objekte besitzen in ihrer Darstellung laut ICAO gelbe Einfärbung [ICAO 14].

In Abbildung 83 wird die Abbildung von Rollführungslinien-Objekten bei verschiedener räumlicher Auflösung dargestellt:



Räumliche Auflösung 0.25m



Räumliche Auflösung 0.5m



Räumliche Auflösung 0.75m



Räumliche Auflösung 1m



Räumliche Auflösung 2m



Räumliche Auflösung 4m

Quelle: Eigene Grafik

Abbildung 83: Abbildung von Rollführungslinien bei verschiedenen räumlichen Auflösungen

Bis zu 1m räumlicher Auflösung ist die Rollführungslinie noch als solche zu identifizieren und einmessbar. Bei 2m räumlicher Auflösung hebt sie sich nicht mehr ausreichend vom Untergrund ab, um noch eindeutig identifiziert zu werden. Schon Hintergrundrauschen im Bild könnte zu Fehlidentifizierungen führen.

Die benötigte räumliche Auflösung zum Extrahieren von linienhaften Objekten einer Flughafendatenbank wird daher mit 1m oder geringer angesetzt.

### Darstellung von punktförmigen Objekten bei verschiedenen räumlichen Auflösungen

Objekte mit punktförmiger räumlicher Ausprägung, deren Oberflächengröße geringer ist als die räumliche Auflösung des Sensors sind in Mischpixeln wesentlich schwieriger zu lokalisieren als linienhafte Objekte, bei denen aufgrund kontinuierlicher Muster auch das Fehlen einzelner Pixel oder von Pixelgruppen den Gesamtkontext nicht stört und sich eine Klassifizierung des Objekttyps auch dann noch durch logische Objektzusammenhänge erschließen lässt, wenn das einzelne Pixel keine Aussagekraft mehr besitzt.

Zum Erfassen der nicht-geometrischen Objekteigenschaften (Objekttyp, Objektklassifikation) wird für meist diskrete und ohne geometrische Muster auftretende Vertical Point Objects eine höhere räumliche Auflösung benötigt als für linienhafte Objekte, da sich nur über die eindeutige visuelle Identifizierung eine Objektklassifikation vornehmen lässt und

unterschieden werden kann, ob es sich bei einem Objekt z.B. um einen Windsack, einen Mast oder eine Antenne handelt.

Die erforderliche räumliche Auflösung zum Extrahieren von punktförmigen Flughafendatenbankobjekten wird durch die abgeschätzte minimale Breite für *Vertical Point Objects* von ca. 0.3m bestimmt. Die Abschätzung bezieht sich auf die nach Do-272a für *Vertical Point Objects* definierten Objekttypen Mast, Antenne und Windsack, welche in der *Vertical Point* Klasse zusammengefasst werden und über ein Attribut unterschieden werden. Abbildung 84 stellt die Größenordnung dieser Objekttypen im Vergleich dar, um das kritischste Objekt mit der geringsten projizierten Oberfläche identifizieren zu können. Über das ausgewählte Objekt wird im nächsten Schritt die benötigte räumliche Auflösung definiert.

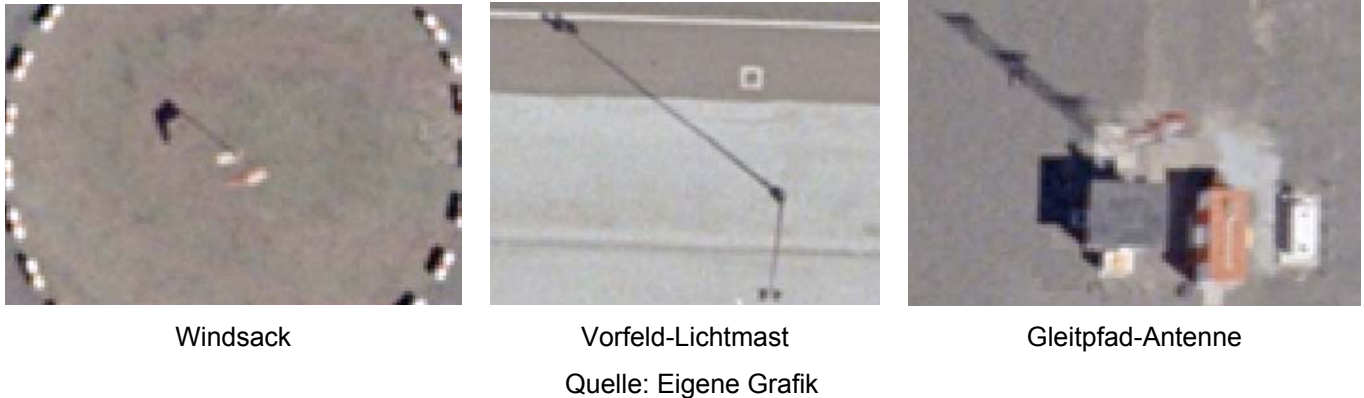
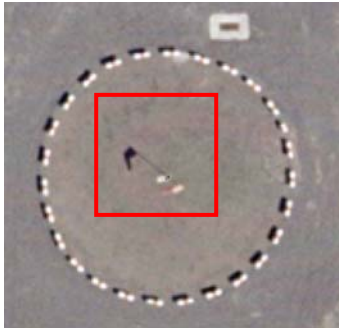


Abbildung 84: Grössenverhältnisse von verschiedenen *Vertical Point Objects*.  
Darstellung im Massstab 1:200

Auffällig ist die im Vergleich zum eigentlichen Objekt relativ große Fläche des Schattenwurfs, welcher vom Sonnenstand und damit der Uhrzeit der Aufnahme sowie vom Aufnahmewinkel abhängig ist. Je mehr sich der Aufnahmezeitpunkt der Mittagszeit nähert, desto geringer wird der Schattenwurf. Während Schattenwurf in den meisten Fällen jedoch nicht gewünscht wird, weil insbesondere im Schatten großer Gebäude Aufnahmedetails verloren gehen können, ist er zur Lokalisierung von kleinflächigen punktförmigen Objekten durchaus hilfreich. Die im Luftbild projizierte Fläche eines punktförmigen Objektes mit vertikaler Ausdehnung (*Vertikal Point Object*) ist abhängig von dem Aufnahmewinkel. Je geringer der Aufnahmewinkel, desto kleiner die durch seitliches Kippen der Punktobjekte projizierte Fläche. In der Nadiraufnahme ist die projizierte Fläche minimiert. Auch hier gilt: Während seitliches Kippen durch großen Aufnahmewinkel in den meisten Fällen nicht gewünscht ist, da durch Abkippen insbesondere großer Gebäude dahinter liegende Aufnahmedetails verloren gehen können, ist er zur Lokalisierung von kleinflächigen punktförmigen Objekten durchaus hilfreich.

Im Vergleich der drei Darstellungen besitzt der Windsack trotz seiner relativ großen Oberfläche die geringste gesamte projizierte Oberfläche sowohl in der Objektabbildung als auch in Bezug auf die Fläche des Schattenwurfs. Daher soll die Herleitung der erforderlichen räumlichen Auflösung zur Identifizierung und Einmessen von *Vertical Point Objects* am Beispiel der Abbildung eines Windsackes vorgenommen werden. In Abbildung 85 wird die Abbildung eines Windsacks bei verschiedenen räumlichen Auflösungen dargestellt, um darauf basierend die minimal benötigte räumliche Auflösung festlegen zu können. In Bezug auf die Abbildungsqualität stellt der ausgewählte Fall jedoch eher den Idealfall mit intensivem Schattenwurf und hierdurch hohem Kontrast zur Umgebung dar.





Übersicht Sensorbild



Ansicht von der Seite

Dimensionen des Windsackes: Höhe ca. 6 m, projizierte Oberfläche Windsack ca.  $2\text{m}^2$ , Durchmesser Mast ca. 0.2m



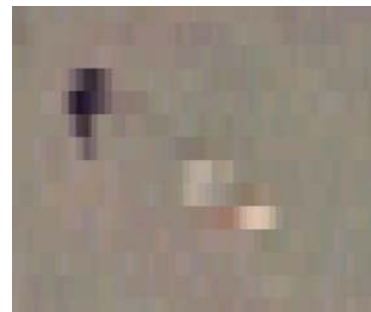
Räumliche Auflösung 0.25 m



Räumliche Auflösung 0.5 m



Räumliche Auflösung 0.6 m



Räumliche Auflösung 0.8 m



Räumliche Auflösung 1m

Quelle: Eigene Grafik

Abbildung 85: Abbildung eines Windsacks bei verschiedenen räumlichen Auflösungen

Bis zu einer räumlichen Auflösung von 0.6 m ist eine Objektidentifizierung für einen geübten Operator noch möglich, der den Zusammenhang zwischen Form des Windsackes und Schattenwurf kennt. Die genaue Lage (der Ort, an dem der Mast im Boden verankert ist) ist nur über den Ursprung des Schattenwurf zu lokalisieren.

Bei 0.8 m räumlicher Auflösung ist eine Objektlokalisierung und -Identifizierung nicht mehr möglich, da der Zusammenhang des Schattenwurfs mit dem eigentlich einzumessenden Objekt wegen zu geringer räumlicher Auflösung nicht mehr besteht.

Die benötigte räumliche Auflösung zum Identifizieren und Einmessen von *Vertical Point Objects* beträgt daher mindestens 0.6 m.

#### **Darstellung von flächenhaften Objekten (Landebahnmarkierung) bei verschiedenen räumlichen Auflösungen**

Die erforderliche räumliche Auflösung von flächenhaften Objekten wird durch die Runway Marking Objekte und im Speziellen durch die (Runway) Painted Centerline – Markierungen mit einer minimalen Breite von 0.3 m bedingt. Im Gegensatz zu Rollführungslinien sind diese jedoch weiß eingefärbt, was in der Regel mit einem geringeren Kontrast zu der darunter liegenden Landebahnoberfläche einhergeht. Abbildung 86 stellt die Darstellung von Landebahnmarkierungen bei verschiedenen räumlichen Auflösungen dar:



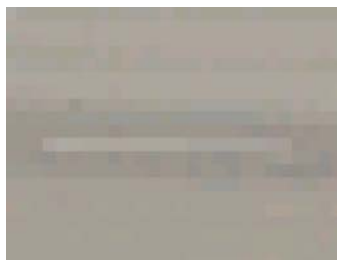
Räumliche Auflösung 0.25m



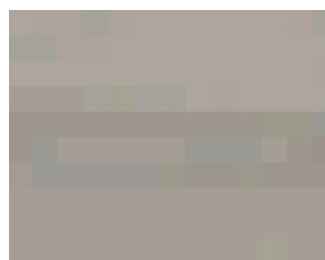
Räumliche Auflösung 0.5m



Räumliche Auflösung 1m



Räumliche Auflösung 2m



Räumliche Auflösung 4m

Quelle: Eigene Grafik

Abbildung 86: Abbildung einer (Runway) Painted Centerline Markierung bei verschiedenen räumlichen Auflösungen

Die (Runway) Painted Centerline Markierung ist bis 1m räumliche Auflösung noch zu identifizieren und einmessbar. Bei 2m räumlicher Auflösung hebt sie nicht mehr ausreichend vom Untergrund ab, um noch eindeutig identifiziert zu werden. Die Anforderung an die räumliche Auflösung von Runway Marking Objekten wird daher auf 1m oder geringer festgelegt.

#### **8.4.2.3.1 Zusammenfassen der Anforderungen räumliche Auflösung**

Um die erforderliche räumliche Auflösung einer fernerkundlichen Bildbasis zur Erstellung von Flughafendatenbanken festzulegen, wird die höchste Anforderung der drei Kategorien punktförmige Objekte, linienhafte Objekte und flächenhafte Objekte festgestellt:

Erforderliche räumliche Auflösung punkthafte Objekte: 0.6 m

Erforderliche räumliche Auflösung linienhafte Objekte: 1 m

Erforderliche räumliche Auflösung flächenhafte Objekte: 1 m

Als Anforderung an die räumliche Auflösung wird 0.6m festgelegt.

#### **8.4.2.4 Zusammenfassung der Anforderungen an die radiometrische, spektrale und räumliche Auflösung von Fernerkundungsdatengrundlagen zum Erstellen von Flughafendatenbanken**

Wegen direkter Wechselwirkungen wurde die erforderliche radiometrische Auflösung in Bezug zur spektralen Auflösung gesetzt. Für Graustufenbilder hat sich eine radiometrische Auflösung von 2048 Helligkeitsstufen (11 bit) als ausreichend erwiesen, um auch bei geringen spektralen Differenzen Objekte noch unterscheiden zu können. Für Sensoren, welche die Abbildung des sichtbaren Spektralbereiches als Farbbild ermöglichen, hat sich eine radiometrische Auflösung von von 4096 Farbstufen (RGB 12 bit) als ausreichend erwiesen.

Anhand von verschiedenen Beispielen wurde nachgewiesen, dass die Fähigkeit zum Identifizieren und korrekten Klassifizieren von Objekten in einer Fernerkundungsszene wesentlich von der farblichen Übereinstimmung des Objektes im Bild mit der visuellen Wahrnehmung des Objektes durch den Menschen in der Realität abhängt. Die spektrale Auflösung eines Sensors muss daher im Bereich des sichtbaren Lichtes liegen und eine Darstellung als Echtfarbenbild erlauben.

Die erforderliche räumliche Auflösung zum Identifizieren und Einmessen von Objekten hängt von der Form und Oberflächengröße des Objektes und der Stärke des Kontrasts in Hinsicht auf seine Umgebung ab. Da die Stärke des Kontrastes zur Umgebung zum einen in beliebig vielen Variationen vorliegen kann, zum anderen auch wesentlich durch die radiometrische und spektrale Auflösung des Fernerkundungsbildes gesteuert wird, wurde dieser Aspekt nicht betrachtet werden. Die minimal erforderliche räumliche Auflösung wurde daher im folgenden in Bezug zur Form und geringsten Oberfläche eines für eine Flughafendatenbank zu erfassenden Objektes gesetzt.



Merkmal	Anforderung	Ratio
<b>Radiometrische Auflösung</b>	Im Graustufenbild: 2048 Helligkeitsstufen (11bit)  Im Echtfarbenenbild: Mind. 4096 Farbstufen (RGB 12 bit)	Ausreichende Unterscheidung von Objekten mit geringen Unterschieden in der spektralen Reflektionscharakteristik
<b>Spektrale Auflösung</b>	Abbildung des sichtbaren Spektralbereichs mit Darstellung als Echtfarbenenbild	Identifizierung von Objekten unter Vermeidung von Fehlklassifikationen sowie ausreichende Unterscheidung von Objekten mit geringen Unterschieden in der spektralen Reflektionscharakteristik
<b>Räumliche Auflösung</b>	< 0.6 m	Lokalisierung und Identifizierung von <i>Vertical Point Objects</i> als Flughafendatenbankobjekte mit der geringsten Grundfläche und ohne charakteristische geometrische Ausprägung

Tabelle 16: Auflösungsanforderungen an Fernerkundungssysteme zum Erfüllen der Vollständigkeit von Flughafendatenbanken

### 8.4.3 Evaluierung des Erfüllens der Vollständigkeit

Zur Evaluierung der Verfahren der Fernerkundung hinsichtlich Vollständigkeit wurden sensorspezifische Eigenschaften aus der Literatur, Produktspezifikationen von verfügbaren Sensorsystemen sowie Erfahrungswerte des Autors aus der Erstellung, Verifizierung und Aktualisierung von folgenden 20 Flughafendatenbanken herangezogen:

Flughafen	Erstellungsverfahren	Aktualisierungsverfahren	Verifizierung
<b>Stuttgart</b>	Chemo-Optisch	-	Vor Ort
<b>Hamburg</b>	Chemo-Optisch	-	-
<b>Augsburg</b>	Chemo-Optisch	-	-
<b>Frankfurt</b>	Chemo-Optisch	Elektro-optisch, GPS-Vermessung	Vor Ort
<b>Manching</b>	Chemo-Optisch	-	-
<b>Amsterdam</b>	Elektro-optisch	-	Vor Ort
<b>Toulouse</b>	Chemo-Optisch	Elektro-optisch, GPS-Vermessung	Vor Ort
<b>Bordeaux</b>	Elektro-optisch	-	-
<b>Nizza</b>	Elektro-optisch	-	-
<b>Paris CDG</b>	Chemo-Optisch	Elektro-optisch	-
<b>Juneau</b>	Chemo-Optisch	GPS- Vermessung	Vor Ort
<b>Reno</b>	Chemo-Optisch	Elektro-optisch, GPS-Vermessung	Vor Ort
<b>Abbotsford</b>	<i>Externe Erstellung</i>	-	Vor Ort
<b>Seattle Boeing Field</b>	<i>Externe Erstellung</i>	-	Vor Ort
<b>Moses Lake</b>	<i>Externe Erstellung</i>	-	Vor Ort
<b>Everett</b>	<i>Externe Erstellung</i>	-	Vor Ort
<b>Renton</b>	<i>Externe Erstellung</i>	-	Vor Ort
<b>Seattle</b>	<i>Externe Erstellung</i>	-	Vor Ort
<b>Quito</b>	Chemo-Optisch	-	-
<b>Addis Abeba</b>	Elektro-optisch	-	-

Tabelle 17: Testfälle für die Evaluierung der Vollständigkeit von mittels Methoden der Fernerkundung erzeugten Flughafendatenbanken

### 8.4.3.1 Chemo-optische Sensoren

#### 8.4.3.1.1 Spektrale Auflösung

Die spektrale Auflösung chemo-optischer Sensoren ist abhängig vom genutzten Luftbildfilm. Je nach Luftbildfilm kann sie sich vom Bereich des sichtbaren Lichtes bis in den nahen Infrarotbereich erstrecken. Hinsichtlich der spektralen Auflösung unterscheidet man folgende Luftbildfilme:

- orthochromatische Filme (blau-grün empfindlich), Wiedergabe in Grauwerten
- panchromatische Filme (blau-, grün-, rot-empfindlich), Wiedergabe in natürlichen Grauwerten
- Farbfilme (blau-, grün-, und rotempfindlich in getrennten Schichten), Wiedergabe als natürliches Farbbild
- Infrarot-Schwarzweiß-Filme (infrarotempfindlich), Wiedergabe in Grauwerten
- Infrarot-Farbfilme (blau-grün-, rot-grün- und nahes Infrarot-empfindlich in getrennten Schichten), Wiedergabe als Farbbild

[Kra1994]

Farbfilme mit blau-, grün- und rotempfindlichen getrennten Schichten die eine Wiedergabe als natürliches Farbbild erlauben, erfüllen die definierten Anforderungen bezüglich spektraler Auflösung.

#### 8.4.3.1.2 Radiometrische Auflösung

Die radiometrische Auflösung photographischer Schichten, auch als Kontrastumfang (Gradiation) bezeichnet gibt an, welche Lichtmenge nötig ist, um für die photographische Emulsion bei der Entwicklung eine gewisse Schwärzung zu erhalten. Sie ist abhängig von der Körnigkeit der Halogensilberkristall-Emulsion des Filmes, aber auch von Umgebungsvariablen während der Aufnahme wie der Flughöhe.

Feinkörnigere Filme besitzen in der Regel eine geringere radiometrische Auflösung als grobkörnigere Filme. Wegen der Überlagerung des vom Objekt remittierten Lichtes durch das Luftlicht verringern sich die Kontraste mit steigender Flughöhe. Für kleinere Bildmaßstäbe (= größere Flughöhen) werden daher Filme mit größerer Gradiation benötigt.

Da Luftbildfilme nicht diskrete Ladungszustände digital aufzeichnen, sondern vielmehr verschiedene Ausprägungszustände der chemischen Reaktion des Lichtes mit Halogensilberkristallen der Emulsion abgebildet werden, kann eine genaue Quantifizierung der radiometrischen Auflösung von Luftbildfilmen nicht erfolgen. Die radiometrische Auflösung von Luftbildfilmen kann jedoch als sehr hoch eingestuft werden [Fri1999]. Erfahrungswerte aus der Erstellung Verifizierung und Aktualisierung der Flughafendatenbanken von Hamburg, Augsburg, Frankfurt, Manching, Toulouse, Reno und Quito (siehe Tabelle 17) auf der Basis von Farb-Luftbildaufnahmen zeigten, dass deren radiometrische Auflösung deutlich über der von elektro-optischen Sensoren des höchsten Leistungssegmentes liegt und eine ausreichende Unterscheidung von Objekten mit geringen Unterschieden in der spektralen Reflektionscharakteristik gewährleisten.

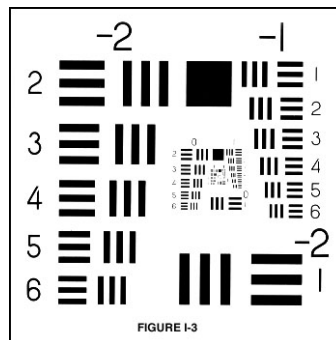
### 8.4.3.1.3 Räumliche Auflösung

Das räumliche Auflösungsvermögen von chemo-optischen Sensoren ergibt sich als Funktion folgender Faktoren:

- der Flughöhe
- der Brennweite des genutzten Objektivs
- der genutzten Blende
- des optischen Auflösungsvermögens des Filmes.

In einem photographischen Film beschreibt die Form und Größe der Silberhalogenid-Kristalle das kleinste Bildelement. Sie entsprechen nicht dem Pixel eines opto-elektronischen Sensors, da sie keine festgelegten Seitenlängen besitzen [Cam1996]. Je geringer die Körnigkeit eines Filmes, desto höher dessen photographische Auflösung [Kra1994].

Die optische Auflösung eines Luftbildfilmes wird als Anzahl der unterscheidbaren Linienpaare pro Millimeter gemessen (lp/mm), die in der Photographie einer genormten Linienabbildung gemessen werden können.



Quelle: [Cam1996]

Abbildung 87: Genormte Linienabbildung zum Ableiten der optischen Auflösung der USAF 1951

Als theoretische, optische Auflösungsgrenze ergibt sich nach Kraus:

$$AV = 2000 / \text{Blendenzahl}$$

AV = theoretische maximale optische Auflösung [LP/mm]

Formel 2: Optisches Auflösungsvermögen

Für eine Blende von 8 ergibt sich also eine theoretische maximale optische Auflösung von 250lp/mm [Kra1994].

Die praktisch erreichbare optische Auflösung von Luftbildfilmen ist abhängig von der spektralen Auflösung und dem Objektcontrast [Kra1994]. Die höchste räumliche Auflösung lässt sich mit einem ausgeglichenen Kontrastumfang erzielen. Panchromatische Filme besitzen ein höheres räumliches Auflösungsvermögen als Farbfilme:

Luftbildfilm Produktname	Spektrale Auflösung	AV [Lp/mm] bei Objektkontrast 1000:1	AV [Lp/mm] bei Objektkontrast 1.6:1
Agfa Avipot Pan 150 PE Polyester	Panchr.	143	45
Agfa Avipot Pan 200 PE Polyester	Panchr.	100	50
Kodak Plus-X-Aerographic 3411 Estar	Panchr.	160	50
Kodak Panatomic-X Aerographic I 3410 Estar	Panchr.	400	125
Kodak High Definition Aerial 3414 Estar Thin Base	Panchr.	800	250
Kodak Aerochrome MS 2448 Estar	Farbe	80	40

Tabelle 18: Optisches Auflösungsvermögen von Luftbildfilmen [Kra1994]

Inwieweit der theoretische Wert auch praktisch erreicht werden kann, hängt wesentlich von der Optik ab. Der Einfluss der Linsenfehler, insgesamt als optische Unschärfe bezeichnet, kann durch stärkeres Abblenden verringert werden, wodurch gleichzeitig aber die Unschärfe durch Beugung (Beugung von Licht an einer kreisförmigen Blende) zunimmt. Das optimale Auflösungsvermögen wird mit jener Blendeneinstellung erzielt, für die sich die Summe aus der optischen und der Beugungsunschärfe minimal auswirkt (kritische Blende) [Fri1999].

Für die in einem Luftbild erreichte räumliche Auflösung spielt letztendlich die Flughöhe eine ausschlaggebende Rolle. Sie kann so angepasst werden, dass die benötigte räumliche Auflösung unter gegebener Beleuchtungssituation, optischer Auflösung des Films, Brennweite sowie genutzter Blende erreicht wird. Die Flughöhe kann basierend auf der erforderlichen räumlichen Auflösung wie folgt berechnet werden:

$$H_F = B \cdot A_R \cdot A_O$$

$H_F$  = maximale Flughöhe zum Erreichen der erforderlichen räumlichen Auflösung [m]

$B$  = Brennweite [mm]

$A_R$  = erforderliche räumliche Auflösung [m]

$A_O$  = optische Auflösung des Luftbildfilmes [Lp/mm]

Formel 3: Berechnung der erforderlichen Flughöhe zum Erreichen einer bestimmten räumlichen Auflösung für chemo-optische Systeme

Aus Formel 3 kann die erforderliche Flughöhe zum Erreichen der Anforderung an räumliche Auflösung von 0.6 m errechnet werden. Für einen Farbfilm (Kodak Aerochrome MS 2448 Estar) bei normalen Objektkontrast (optische Auflösung 80Lp/mm) und unter Nutzung eines Weitwinkelobjektives (305 mm) ergibt sich eine maximale Flughöhe von 14.460 m. Liegt die Flughöhe darunter, wird eine bessere räumliche Auflösung erzielt. Luftbildflüge werden in der Regel deutlich tiefer durchgeführt, um allzu starke Verringerung der Kontraste durch Überlagerung des vom Objekt remittierten Lichtes durch das Luftlicht zu vermeiden, und um im Sichtflugbereich operieren zu können. Im Rahmen einer Tiefbefliegung in 1000m Höhe kann unter identischen Vorgaben bezüglich Film und Objektiv eine räumliche Auflösung von 0.05 m erzielt werden.

Die erzielbare räumliche Auflösung ist daher deutlich besser als die abgeleitete erforderliche räumliche Auflösung von 0.6m.

Da die erreichbare optische Auflösung von Objektiven normalerweise deutlich höher als das optische Auflösungsvermögen von Luftbildfilmen ist, kann sie vernachlässigt werden. Die gegebene Beleuchtungssituation wird im Rahmen der angesetzten optischen Auflösung des Luftbildfilmes berücksichtigt.

Bei der Weiterverarbeitung von Luftbildern im Rahmen von digitalen Photogrammetrieprozessen muss darauf geachtet werden, dass bei der Digitalisierung ein adäquates Digitalisierungsintervall gewählt wird, um die erzielte räumliche Auflösung im analogen Luftbild nicht unbeabsichtigt zu verschlechtern.

### 8.4.3.1.4 Falluntersuchung: Tiefbefliegung Flughafen Frankfurt mit Messkammer RMK 15/23

Im Rahmen einer Falluntersuchung anhand von Luftbildern des Frankfurter Flughafens sollen die Aussagen zur Evaluierung der Vollständigkeit in Bezug auf die Auflösungsparameter chemo-optischer Sensoren überprüft werden. Hierzu wurden verschiedene kritische Szenen ausgewählt, anhand denen sich das Potential von Luftbildern besonders gut darstellen lässt.

Luftbild Flughafen Frankfurt, Tiefbefliegung

Bildmassstab: 1:13.000

Messkammer: Carl Zeiss RMK 15/23

Digitalisierungsintervall: 20  $\mu\text{m}$

Räumliche Auflösung  
des digitalen Bildes: 0.1 m

Digitales Bildformat: TIFF



Quelle: Eigene Grafik

Abbildung 88: Falluntersuchung Tiefbefliegung Flughafen Frankfurt: Spektrale Auflösung

Abbildung 88 verdeutlicht die spektrale Auflösung des Farbluftbild über den gesamten Bereich des sichtbaren Lichtes. Verschiedenfarbige Rollführungs- und Begrenzungslinien lassen sich deutlich identifizieren. Im rechten Ausschnitt des Rollweges N East (rechtes Bild) lassen sich deutlich eine blaue, gelbe und orange Rollführungsline unterscheiden. In Frankfurt wird diese Farbgebung genutzt, um abhängig von der Spannweite mehrere Flugzeuge parallel auf einem Rollweg operieren zu lassen. Die korrekte Identifizierung der Farbe der Rollführungsline ist im Rahmen der Erstellung von Flughafendatenbanken sicherheitskritisch.



Quelle: Eigene Grafik

Abbildung 89: Falluntersuchung Tiefbefliegung Flughafen Frankfurt: Radiometrische Auflösung

Abbildung 89 zeigt die hohe radiometrische Auflösung des Farbluftbildes. In dem links markierten Ausschnitt des Rollweges M1 lassen sich in vergrößerter Ansicht die abgenutzten weissen und gelben Markierungen trotz des geringen spektralen Unterschieds zur hellen Betonoberfläche noch deutlich erkennen.



Quelle: Eigene Grafik

Abbildung 90: Falluntersuchung Tiefbefliegung Flughafen Frankfurt: Räumliche Auflösung

Abbildung 90 verdeutlicht die hohe räumliche Auflösung, die nach Digitalisierung der chemo-optischen Bildbasis noch 0.1 m beträgt. Die Prüfantenne des Gleitpfadsenders von Runway 25L, im rechten Ausschnitt vergrößert gezeigt, lässt sich eindeutig identifizieren und ihre Lage genau festlegen.

##### **8.4.3.1.5 Abgleich der Anforderungen mit Produktspezifikationen**

Im Abgleich der abgeleiteten Anforderungen an räumliche, spektrale und radiometrische Auflösung mit den Produktspezifikationen der in Tabelle 9 aufgeführten chemo-optischen Sensoren wurden die Bereiche, welche die Anforderungen erfüllen, hellgrün und solche, welche die Anforderungen nicht erfüllen, rot eingefärbt. Es ergibt sich folgendes Bild:

Sensor-system	Sensor-plattform	Räumliche Auflösung	Spektrale Auflösung	Radiometrische Auflösung
<b>Leica:</b>  <b>RC-20</b>  <b>RC-30</b>	Flugzeug	Abhängig von - Flughöhe - Film - Brennweite (ca. 0.05 – 0.5 m)	Abhängig vom Film:  Farbfilm erfüllt Anforderungen	Sehr hoch
<b>Carl Zeiss:</b>  <b>LMK 1015</b>  <b>LMK 15/23</b>  <b>RMK 1TOP</b>  <b>RMK-15/23</b>	Flugzeug	Abhängig von - Flughöhe - Film - Brennweite (ca. 0.05 – 0.5 m)	Abhängig vom Film:  Farbfilm erfüllt Anforderungen	Sehr hoch
<b>KVR 1000</b>  <b>[Fri199]</b>	Satellit	2m	Panchromatisch	Sehr hoch

Tabelle 19: Übersicht chemo-optischer Fernerkundungssysteme

**Fazit**

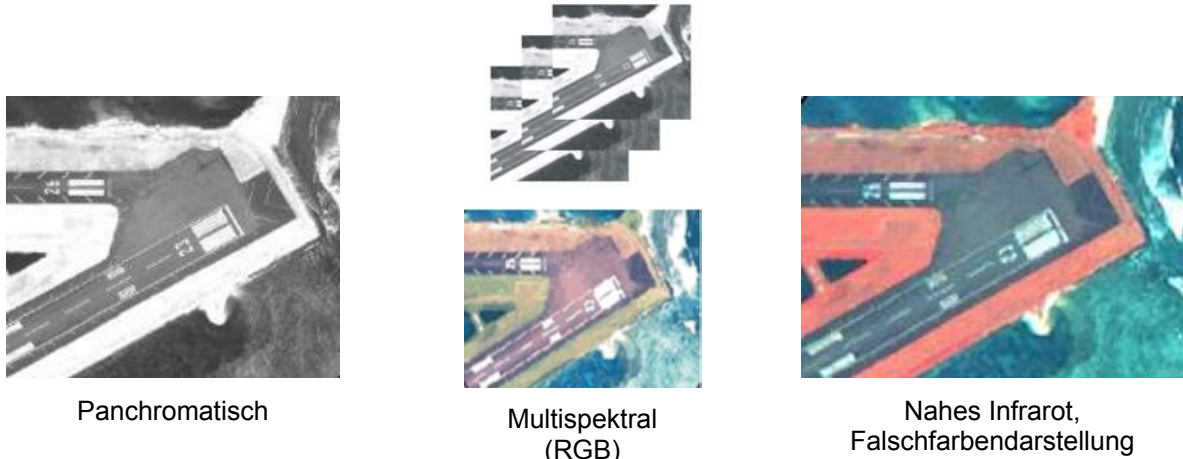
Alle flugzeuggestützten chemo-optische Sensoren erfüllen die gestellten Anforderungen bei der adäquaten Auswahl der Variablen des Luftbildfilms (Farbfilm, optisches Auflösungsvermögen) und der Flughöhe. Lediglich der satellitengestützte Sensor KVR 1000 erfüllt wegen seiner hohen Flughöhe und eines panchromatischen Films die Anforderungen an spektrale und räumliche Anforderungen nicht.



### 8.4.3.2 Elektro-optische Sensoren

#### 8.4.3.2.1 Spektrale Auflösung

Gängige Spektralbereiche elektro-optischer Sensoren umfassen das sichtbare Licht mit den Kanälen blau, grün, rot, das nahe Infrarot sowie einen panchromatischen Kanal, der über das gesamte sichtbare Spektrum empfindlich ist. Vereinzelt werden auch Kanäle für mittleres und thermales Infrarot eingesetzt [NOAA2005]. Sensoren, welche mehrere Spektralbereiche gleichzeitig erfassen (z.B. rot, grün, blau und nahes Infrarot) werden auch als Multispektralscanner bezeichnet.



Quelle: [NOAA2005]

Abbildung 91: Beispiele spektraler Auflösung elektro-optischer Sensoren

Für die Aufzeichnung des Spektralbereiches des sichtbaren Lichtes durch elektro-optische Zeilenscanner muss das einfallende Licht in fest definierte spektrale Bereiche zerlegt werden, die als einzelne Kanäle aufgezeichnet werden. Dieser Prozess wird durch verschiedene Filtertechniken wie Interferenzfilter, optische Brechung und Beugung sowie Absorptionsfilter durchgeführt.

Die drei Farbkanäle rot, grün und blau eines Multispektralscanners werden zum Erzeugen eines Echtfarbenbildes miteinander kombiniert. Wird den Farbkanälen die korrekte Grundfarbe zugewiesen, entspricht die resultierende farbliche Wiedergabe der menschlichen Wahrnehmung.



Quelle: Eigene Grafik

Abbildung 92: Kombination von 3 Rot-, Grün-, und Blaukanälen (links) zu einem Echtfarbenbild (rechts)

Elektro-optische Multispektralscanner, welche den Spektralbereich des sichtbaren Lichtes mit den drei Farbkanälen rot, grün und blau erfassen, erfüllen demnach die Anforderung an die spektrale Auflösung.

#### **8.4.3.2.2 Radiometrische Auflösung**

Die einfallende Strahlung erzeugt in einem CCD-Element des elektro-optischen Sensors eine Ladung, welche von der Strahlungsintensität abhängig ist. Sie wird mittels eines Analog-Digitalwandlers in einen digitalen Wert gewandelt. Die meisten opto-elektronischen Zeilenscanner arbeiten mit 8 bit – 11 bit Farbtiefe pro Kanal, unterscheiden also 256 bis 2048 Grauwertstufen (siehe Tabelle 20). Ein panchromatischer Kanal mit 8 bit Farbtiefe zeichnet den gesamten Bereich des sichtbaren Lichtes mit 256 Graustufen auf, während ein panchromatischer Kanal mit 11 bit Farbtiefe den Bereich des sichtbaren Lichtes mit 2048 Farbstufen aufzeichnet und daher eine feinere Unterscheidung von spektralen Variationen ermöglicht. Zur Erstellung eines Echtfarbenbildes des sichtbaren Bereiches werden die Spektralbereiche der Farben blau, grün und rot in getrennten Kanälen mit jeweils 8 bit – 11 bit radiometrischer Auflösung aufgezeichnet und kombiniert. Das resultierende Echtfarbenbild besitzt eine Farbtiefe von  $3 \times 8 - 11$  bit, entsprechend 16.7 Mio. bis 8589 Mio. Farben. Die Anforderung an die radiometrische Auflösung werden demnach von Multispektralscannern, welche den Bereich des sichtbaren Lichtes mit drei Einzelkanälen mit jeweils mindestens 8bit radiometrischer Auflösung abdecken, erfüllt.

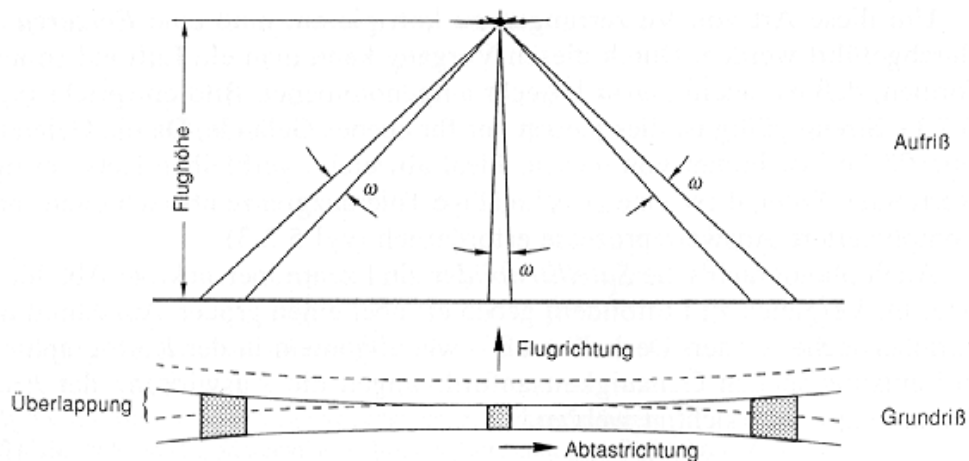
#### **8.4.3.2.3 Räumliche Auflösung**

Die räumliche Auflösung von elektro-optischen Zeilenscanner ist abhängig von

- der Flughöhe
- der Anzahl an CCD-Elementen pro Zeile
- der Brennweite der Optik

Je niedriger die Flughöhe der Sensorplattform und je größer die Anzahl an CCDs für ein durch die Brennweite der Optik bestimmtes *Field of View*, desto höher die räumliche Auflösung.

Die höchste räumliche Auflösung von CCDs wird bei Zeilenscannern nur senkrecht unterhalb der Flugbahn im Nadir erreicht. Je weiter seitwärts die Pixel in der Bildebene angeordnet sind, desto größer wird die von ihnen aufgezeichnete Fläche auf der Erdoberfläche; der Bildmaßstab wird kleiner (siehe Abbildung 93, nächste Seite).



Quelle: [Alb1991]

Abbildung 93: Verzerrung eines Bodensegments mit zunehmendem Abstand vom Nadir bei einem Zeilenscanner

Insbesondere bei satellitengestützten Systemen besitzt der panchromatische Kanal in der Regel eine deutlich höhere räumliche Auflösung als die Farbkanäle eines Multispektralscanners. Durch die Kombination eines hochauflösenden panchromatischen Kanals mit den geringer auflösenden Multispektralkanälen kann ein hochauflösendes Satellitenbild im Echtfarben erzeugt werden (pansharpening), wodurch die Interpretierbarkeit deutlich erhöht werden kann [ERD1999].

Die maximale räumliche Auflösung von verfügbaren Systemen liegt für flugzeuggestützte Sensoren je nach Flughöhe bei bis zu 0.15 m, für satellitengestützte Systeme bei 30 – 0.6 m (siehe Tabelle 20). Daher kann an dieser Stelle keine allgemeine Aussage zum Erfüllen der Anforderungen bezüglich räumlicher Auflösung gemacht werden; die Evaluierung erfolgt produktspezifisch in Kapitel 8.4.3.2.5.

#### 8.4.3.2.4 Falluntersuchung: IKONOS- 2 und Quickbird-2

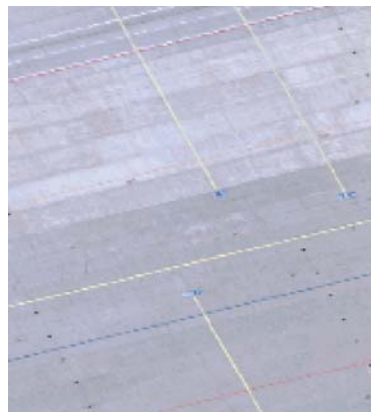
In der folgenden Falluntersuchung werden die hochauflösenden elektro-optischen Satellitenbildsensoren IKONOS-2 und Quickbird-2 bezüglich ihrer räumlichen, radiometrischen und spektralen Auflösung zur Gewährleistung der Vollständigkeit von Flughafendatenbanken untersucht.



Quelle: Eigene Grafik

Abbildung 94: Ausschnitt Flughafen Frankfurt im IKONOS II pansharpending Echtfarbenbild.

Die in Abbildung 94 gezeigte IKONOS-2 Satellitenbildszene wurde durch pansharpending der niedriger auflösenden Rot-, Grün-, und Blaukanäle (4m räumliche Auflösung) mit dem hochauflösenden panchromatischen Kanal (ca. 0.8 m räumliche Auflösung) erzeugt. Die resultierende räumliche Auflösung wurde herstellerseitig auf ca. 1 m reduziert. Die spektrale Auflösung reicht über den gesamten Bereich des sichtbaren Lichtes.



Quelle: Eigene Grafik

Abbildung 95: Falluntersuchung IKONOS-2: Spektrale Auflösung

Die spektrale Auflösung der pansharpend IKONOS-2 Szene wird in Abbildung 95 dargestellt. Eine ähnliche Abbildung des Rollweges N East ist in der durch chemo-optische Luftbildsensoren aufgenommenen Abbildung 88 dargestellt, jedoch mit einer deutlich besseren räumlichen Auflösung. Trotz der geringeren räumlichen Auflösung lassen sich die gelben, blauen und roten Rollführungslinien in dem Satellitenbild noch deutlich voneinander unterscheiden.



Quelle: Eigene Grafik

Abbildung 96: Falluntersuchung IKONOS-2: Radiometrische Auflösung

Abbildung 96 stellt einen Ausschnitt der Satellitenbildszene des Flughafen Frankfurts vom Südende der Startbahn 18 West dar. Sie ist als besonders kritischer Bereich ausgewählt worden, um das radiometrische Potential von elektro-optischen Sensoren darzustellen. Die radiometrische Auflösung der IKONOS-2 Szene beträgt als Kombination der drei Farbkanäle rot, grün und blau 3 x 8 bit entsprechend 16.7 Mio Farben. Der sehr helle Betonuntergrund ähnelt in seiner spektralen Charakteristik stark der weissen Mittellinienmarkierung. Aufgrund der hohen radiometrischen Auflösung lässt sich die Markierung jedoch noch ausreichend vom Untergrund unterscheiden, um als eigenständiges Objekt erfasst zu werden.

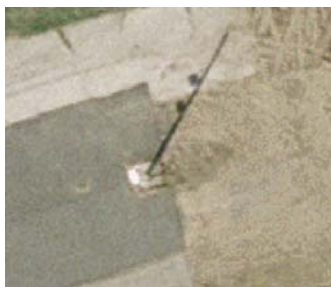


Abbildung einer Antenne im hochauflösenden Farbluftbild (0.25 m räumliche Auflösung)



Abbildung einer Antenne im IKONOS-2-Satellitenbild pansharpened (ca. 1m räumliche Auflösung)

Quelle: Eigene Grafik

Abbildung 97: Falluntersuchung IKONOS-2: Räumliche Auflösung

Die räumliche Auflösung des IKONOS-2 Sensors von ca. 1m ist in Abbildung 97 im Vergleich zu einem deutlich höher auflösendem Luftbild dargestellt. Die Gleitpfadantenne, welche im hochauflösenden Farbluftbild eindeutig zu identifizieren ist, lässt sich nicht mehr ohne weiteres identifizieren (der Operator muss Kenntnis davon besitzen, dass sich an dieser Stelle eine Antenne befindet). Da kein starker Schattenwurf vorhanden ist, könnte das linienhafte Element vom Operator auch übergangen werden.



Abbildung eines Windsackes im hochauflösenden Farbluftbild (0.25 m räumliche Auflösung)

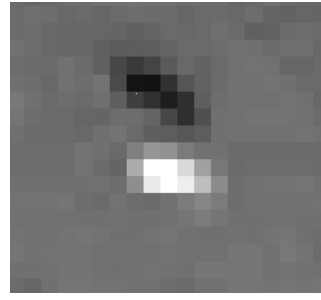


Abbildung eines Windsackes im Quickbird-2 Satellitenbild panchromatisch (Auflösung reduziert auf ca. 1m)

Quelle: Eigene Grafik

Abbildung 98: Falluntersuchung Quickbird-2: Räumliche Auflösung

Dasselbe gilt in noch grösserem Umfang für die Abbildung eines Windsackes in Abbildung 98. Die panchromatische Quickbird-2 Szene besaß ursprünglich eine räumliche Auflösung von 0.6 m, wurde jedoch herstellerseitig auf ca. 1m reduziert. Der Windsack ist wegen des Schattenwurfs als Objekt mit vertikaler Ausdehnung nur für einen geschulten Operator zu erkennen; die Identifizierung des Windsacks als solcher kann basierend auf der Quickbird-2 Szene nicht vorgenommen werden.

#### 8.4.3.2.5 Abgleich der Anforderungen mit Produktspezifikationen

Im Abgleich der Anforderungen an räumliche, spektrale und radiometrische Auflösung mit den Produktspezifikationen der in Tabelle 10 aufgeführten elektro-optischen Sensoren wurden die Bereiche, welche die abgeleiteten Anforderungen erfüllen, hellgrün und solche, welche die Anforderungen nicht erfüllen, rot eingefärbt:

Sensor-System	Plattform	Räumliche Auflösung pan = panchromatisch ms = multispektral	Spektrale Auflösung MIR = Mittleres IR NIR = Nahes IR TIR = Therm. IR	Radiometrische Auflösung
DLR <b>HRSC-A</b> [Fri1999]	Flugzeug	Abhängig von der Flughöhe (0.1m in 2500m Flughöhe)	- R/G/B - panchromatisch	8 bit/Kanal
Leica <b>ADS-40</b> [San2000]	Flugzeug	Abhängig von der Flughöhe (0.16 m in 3000m Flughöhe))	- R/G/B - NIR - panchromatisch	8 bit/Kanal
GeoEye <b>Ikonos 2</b> [NOAA2005]	Satellit	<b>Nadir:</b> 0.82 m (pan.) 3.2 m (ms.)	- R/G/B - NIR - panchromatisch	11 bit/Kanal

Sensor-System	Plattform	Räumliche Auflösung pan = panchromatisch ms = multispektral	Spektrale Auflösung MIR = Mittleres IR NIR = Nahes IR TIR = Therm. IR	Radiometrische Auflösung
		<b>26° Off-Nadir</b> 1.0 m (pan.) 4.0 m (ms.)		
GeoEye <b>GeoEye-1</b> [Geo2008]	Satellit	<b>Nadir:</b> 0.41 m (pan.) 1.65 m (ms.)	- R/G/B - NIR - panchromatisch	11 bit/Kanal
DigitalGlobe <b>Quickbird-2</b> [NOAA2005]	Satellit	<b>Nadir:</b> 0.61 m (pan.) 2.4 m (ms.) <b>25° Off-Nadir</b> 0.72 m (pan.) 2.8 m (ms.)	- R/G/B - NIR - panchromatisch	11 bit/Kanal
DigitalGlobe <b>Worldview-1</b> [Dig2008]	Satellit	<b>Nadir:</b> 0.5 m <b>25° Off-Nadir</b> 0.59 m	- panchromatisch	11 bit
ImageSat Int. <b>EROS A</b> [ITC2005]	Satellit	1 - 1.9 m	Panchromatisch	11 bit
ImageSat Int. <b>EROS B</b> [Ima2007]	Satellit	0.7 m	Panchromatisch	10 bit
<b>IRS P6</b>	Satellit	6 m	- Rot - Grün - NIR - MIR - panchromatisch	10 bit/Kanal
<b>SPOT 5</b> [NOAA2005]	Satellit	2.5 m (pan.) 10 m (mst.)	- R/G/B - NIR - MIR - panchromatisch	8 bit/Kanal
<b>Landsat 7</b> [NOAA2005]	Satellit	15m (pan.) 30m (ms.)	- R/G/B - NIR - MIR - FIR - TIR - panchromatisch	8 bit/Kanal

Tabelle 20: Abgleich der Anforderungen mit Produktspezifikationen elektro-optischer Fernerkundungssysteme

### Fazit

Lediglich die flugzeuggestützten elektro-optischen Sensoren erfüllen alle Anforderungen zum Erzeugen einer Fernerkundungsbildbasis unter Berücksichtigung der Gewährleistung der Vollständigkeit. Ausschlusskriterium für die meisten satellitengestützte Sensoren ist insbesondere deren zu geringe räumliche Auflösung, bedingt durch den grossen Abstand zur Erdoberfläche. Flugzeuggestützte Sensoren haben einen wesentlich geringeren Abstand zur Erdoberfläche und können diesen variabel gestalten, um sich spezifischen Anforderungen an die räumliche Auflösung anzupassen. Die höchstauflösenden Satellitenbildsensoren GeoEye-1 sowie Quickbird-2 erreichen den Grenzbereich der benötigten räumlichen Auflösung, jedoch lediglich für den panchromatischen Kanal (Quickbird 2 hier nur bei Nadirabbildung). Durch das *pansharpening*, einer nachträglichen Verbesserung der räumlichen Auflösung eines Echtfarbenbildes durch Kombination des höchstauflösenden panchromatischen Kanals mit den drei niedriger auflösenden Farbkanälen können sowohl GeoEye-1 als auch Quickbird-2 die Anforderung an räumliche als auch an spektrale Auflösung erfüllen.

Der satellitengestützte Sensor Worldview-1 bietet zwar ausreichend hohe räumliche Auflösung, kann jedoch nicht die Anforderungen an spektrale Auflösung erfüllen, um Objekte ausreichend unterscheiden zu können, da er lediglich panchromatische spektrale Auflösung besitzt und somit keine Darstellung von Objekten in Echtfarben erlaubt.

Die Anforderung bezüglich radiometrischer Auflösung werden von fast allen betrachteten Systemen erfüllt.



### 8.4.3.3 Synthetic Aperture Radar - Radarintensitätsbilder

#### 8.4.3.3.1 Spektrale Auflösung

SAR benutzt verschiedene Frequenzbänder, die sich in der objektspezifischen Reflektionscharakteristik unterscheiden. Üblich ist die Kennzeichnung einzelner Spektralbereiche durch Buchstaben:

Frequenzband	Wellenlänge $\lambda$	Frequenz
<b>P-Band</b>	<b>60-300 cm</b>	<b>0,2-0,5 GHz</b>
<b>L-Band</b>	<b>15-30 cm</b>	<b>1-2 GHz</b>
<b>C-Band</b>	<b>4,5–7,5 cm</b>	<b>4-7 GHz</b>
<b>X-Band</b>	<b>2,4–4,5 cm</b>	<b>7-12 GHz</b>
<b>A-Band</b>	<b>0,7-1 cm</b>	<b>30-40 GHz</b>

Tabelle 21: Radar-Frequenzbereiche [Alb2001]

Die durch Radarsensoren aufgezeichnete Darstellung der Erdoberfläche entspricht nicht der natürlichen Wahrnehmung des Menschen, da nicht die Reflektion des Sonnenlichts im sichtbaren Bereich aufgezeichnet wird, sondern die Intensität der Rückstrahlung der genutzten Radarstrahlung, welche innerhalb eines engen Spektralbereiches ausserhalb des Bereichs des sichtbaren Lichtes liegt. Gleiche Objekte im Radarintensitätsbild werden je nach genutztem Frequenzband unterschiedlich abgebildet, da die Reflektionscharakteristik eines Objektes unter anderem eine Funktion der Wellenlänge der einfallenden Strahlung ist.

Eine Vielzahl weiterer Faktoren beeinflusst die Darstellung im Radar-Intensitätsbild:

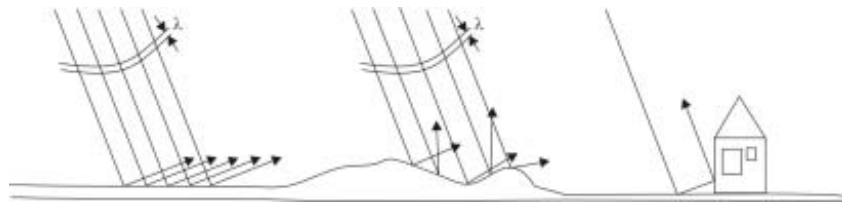
- die Polarisation der Strahlung
- der Depressionswinkel
- die Flughöhe
- die Faktoren der Geländeoberfläche wie z.B. die Geländerauhigkeit
- die Oberflächenform
- die elektrischen Eigenschaften der bestrahlten Objekte

[Cam1996]

Um die Güte der Objektidentifizierung im Radarintensitätsbild zur Gewährleistung der Vollständigkeit beurteilen zu können, müssen nicht nur die spektrale Auflösung des SAR, sondern auch weitere Umgebungsvariablen beachtet werden.

Ein bedeutendes Problem bei der Auswertung von Radarintensitätsbildern ist die Abhängigkeit der Rückstreuintensität von der lokalen Geländeneigung. Unterschiedliche Geländeneigung in Bezug auf die Blickrichtung des Sensors führt unter sonst gleichen Bedingungen zu stark veränderten Grauwerten [HAG1998]. Eine unebene Oberflächenform führt dazu, dass den schräg einfallenden Strahlen zugewandte Flächen im Radarbild anders abgebildet werden, als den Strahlen abgewandte Flächen. Ist eine Fläche stärker geneigt, als der Depressionswinkel, entsteht eine schwarze Stelle, ein so genannter Radarschatten, für den keine Intensitätsinformation vorliegt. Aufgrund der Tatsache, dass Flughäfen auf nahezu ebenen Flächen liegen, muss diese Problematik hier jedoch nicht weiter berücksichtigt werden.

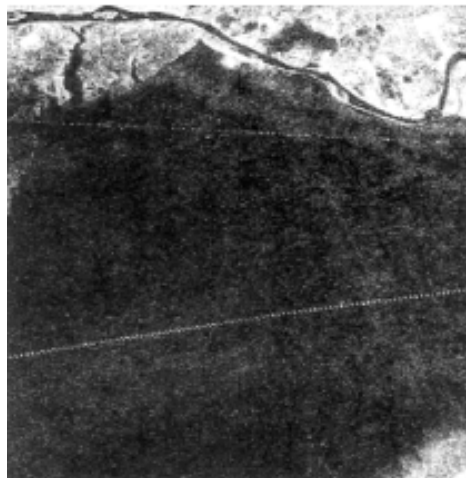
Dunkle Flächen mit geringer Rückstrahlungsintensität entstehen auch dann, wenn die Rauigkeit der Oberfläche im Vergleich zur benutzten Wellenlänge gering ist, und die Strahlung praktisch gespiegelt wird. Dies kommt z.B. bei Wasserflächen vor, die stets schwarz wiedergegeben werden. Aber auch Sandflächen können aufgrund ihrer Glätte die Strahlung spiegeln [Alb2001]. Man spricht hier auch von gerichteter Reflexion [KRA2003]. Auch bei geringem Einfallswinkel relativ zum Objekt liegt die Rückstrahlungsrichtung nahe der einer gerichteten Reflexion, so dass das reflektierte Signal geringer wird. Mit zunehmender Oberflächenrauigkeit nimmt die Reflexion in der Regel zu, da sie diffuser wird, so dass ein immer größer werdender Teil der Radarsignale zurückgestrahlt und vom Sensor empfangen wird. Auch der so genannte Rückstrahler-Effekt ist eine Besonderheit von Radaraufzeichnungen. Er tritt auf, wenn glatte waagrechte und glatte senkrechte Oberflächen wie Hauswände und Straßen mit ihrer Schnittgeraden senkrecht zur Einstrahlungsrichtung liegen. Durch eine zweifache gerichtete Reflexion an der horizontalen und der vertikalen Fläche wird das Signal genau in Richtung zum Sensor zurückgeworfen, also im 180°- Winkel. Dadurch kommt es zu einer Überstrahlung im Radarbild.



Quelle: [PAU2005]

Abbildung 99: Reflexion von Mikrowellen an Oberflächen verschiedener Rauigkeit. Links: Spiegelnde Reflexion. Mitte: Diffuse Reflexion Rechts: Rückstrahler- Effekt

Die Intensität der Reflexion ist auch von der elektrischen Eigenschaft der Oberfläche abhängig. Besonders starke Reflexion tritt an metallischen Strukturen wie Zäunen und Oberleitungen auf. Hierin beruht auch ein deutlicher Vorteil von SAR gegenüber passiven chemo- und elektro-optischen Sensoren, denn durch sehr hohe Reflektionsintensität bestimmter Objekte im Vergleich zu ihrer Umgebung werden diese im Intensitätsbild abgebildet, obwohl sie räumlich nur geringe Ausdehnung haben. So werden in Abbildung 100 metallische, elektrische Oberleitungen in einem SAR-Intensitätsbild (geschätzte räumlich Auflösung ca. 5m) abgebildet, obwohl deren wirklicher Durchmesser nur im Dezimeterbereich liegt.



Quelle: [Alb1989]

Abbildung 100: SAR-Bild aus der ägyptischen Wüste mit Abbildung von metallischen, elektrischen Oberleitungen

Ebenso wie die elektrischen Eigenschaften beeinflusst die Feuchtigkeit der Oberfläche, welche deren Dielektrizitätskonstante ändert die Stärke der Reflektion. Feuchte Böden reflektieren stark und erscheinen somit heller im Intensitätsbild, da die Mikrowellen durch „Wirbelstromverluste“ gedämpft werden [KRA1998]. Gleichzeitig dringt die Mikrowellenstrahlung nur wenig in den Untergrund ein. Mit abnehmender Feuchtigkeit wird das Reflexionsvermögen geringer, die Eindringtiefe nimmt zu.

Aus der Darstellungscharakteristik von Objekten in Radarintensitätsbildern wird geschlossen, dass unabhängig von der gewählten Radarfrequenz keine der menschlichen Wahrnehmung identische oder auch nur ähnliche Darstellung erfolgt und somit eine eindeutige Identifizierung von Flughafendatenbankobjekten nicht gewährleistet werden kann. Diese These wurde in der Falluntersuchung (siehe Kapitel 8.4.3.3.4) bei der Analyse verschiedener X-Band Radarintensitätsbilder des Flughafens Reno belegt.

### **8.4.3.3.2 Radiometrische Auflösung**

In Radarintensitätsbildern werden keine spektralen Variationen von Objektreflektionen, sondern die Rückstrahlungsintensität bezüglich eines definierten engen Spektralbereichs aufgezeichnet. Die Rückstrahlungsintensität ist von einer Vielzahl von sowohl Sensor- als auch Objekteigenschaften abhängig (siehe Kapitel 8.4.3.3.1). Die radiometrische Auflösung muss ausreichend sein, um auch Objekte mit nur geringen Unterschieden in der Rückstrahlungsintensität noch voneinander unterscheiden zu können.

Radar-Intensitätsbilder werden in der Regel mit einer radiometrischen Auflösung von 8-16 bit pro Kanal aufgezeichnet (256 – 65536 Farbstufen, siehe Tabelle 22).

### **8.4.3.3.3 Räumliche Auflösung**

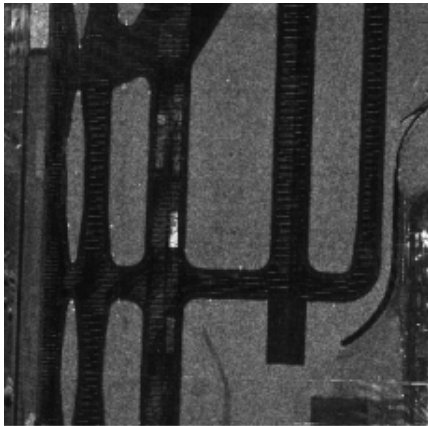
Die räumliche Auflösung von Radarintensitätsbildern hängt von den Eigenschaften der Mikrowellenstrahlung und den geometrischen Effekten ab.

- Die Auflösung quer zur Flugrichtung (Range) hängt von der Pulslänge der Mikrowellenfront ab. Kürzere Pulslängen ergeben feinere Auflösungen. Ebenso wirkt sich der Depressionswinkel auf die räumliche Auflösung quer zur Flugrichtung aus. Mit steigendem Depressionswinkel verschlechtert sich die räumliche Auflösung quer zur Flugrichtung.
- Die Auflösung in Flugrichtung (Azimut) hängt von dem räumlichen Abstrahlwinkel in Flugrichtung, der Entfernung zum Aufnahmeobjekt (eine Funktion der Flughöhe und des Depressionswinkels) und der Größe der Antenne ab. Um die Auflösung zu Erhöhen, wird bei SAR-Systemen zur Simulation einer sehr großen Antenne die Basislinie, d.h. der Abstand zwischen der Aufnahme zweier identischer Punkte erhöht.

Gängige Auflösungen von satellitengestützten SAR-Systemen liegen im 10m bis 100m Bereich, der von flugzeuggestützten Systemen im 1.25m – 5 m Bereich [NOAA2005].

### **8.4.3.3.4 Falluntersuchung Intermap STAR 3i IFSAR**

In der folgenden Falluntersuchung wird der Intermap STAR 3i IFSAR Sensor bezüglich seiner Abbildungsparameter zur Gewährleistung der Vollständigkeit von Flughafendatenbanken untersucht.



Intensitätsbild Intermap STAR 3i IFSAR, X-Band

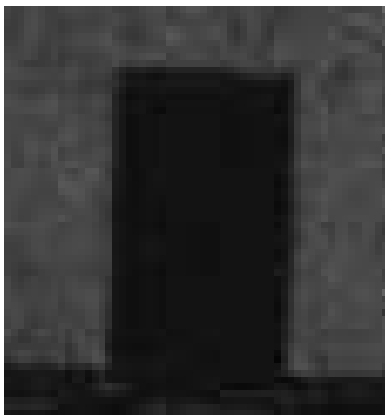


Farbluftbild

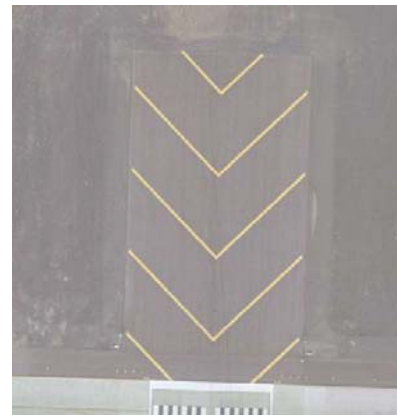
Quelle: Eigene Grafik

Abbildung 101: Falluntersuchung Intermap STAR 3i IFSAR: Abbildung von Landebahn und Rollwegen im Radar-Intensitätsbild (links) und im Referenzbild (rechts; Farbluftbild Flughafen Reno)

Auf dem Radarintensitätsbild in Abbildung 101 lassen sich asphaltierte bzw. betonierte Flächen deutlich von umgebenden unbefestigten Flächen unterscheiden; Rollwege und Landebahnen, in der Realität durch weiße bzw. gelbe Markierungen markiert, lassen sich jedoch nicht voneinander unterscheiden, da sich die Objektreflektion der Markierungen nicht ausreichend von der Beton- bzw. Asphaltoberfläche von Rollwegen und Landebahnen unterscheidet.



Intensitätsbild Intermap STAR 3i IFSAR, X-Band

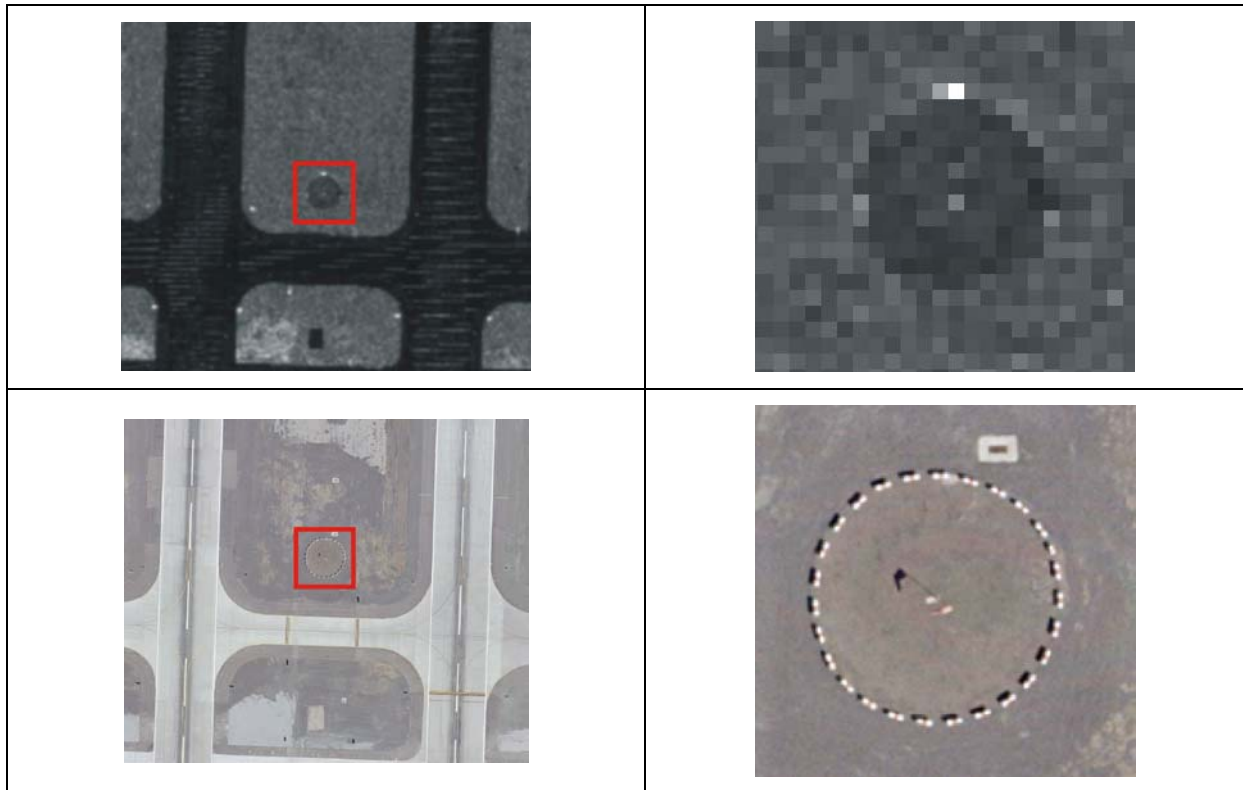


Farbluftbild

Quelle: Eigene Grafik

Abbildung 102: Falluntersuchung Intermap STAR 3i IFSAR: Abbildung eines Blastpads mit Markierung im Radar-Intensitätsbild und im Referenzbild (rechts; Farbluftbild Flughafen Reno)

In Abbildung 102 ist deutlich zu erkennen, dass sich die asphaltierte Fläche des Blastpads im Echtfarbenbild (rechts) spektral kaum von dem umgebenden Boden unterscheidet, im SAR-Intensitätenbild (links) hebt sie sich aufgrund der stark unterschiedlichen Rückstrahlungsintensität jedoch deutlich davon ab (schwarze Fläche). Daher ist die benötigte radiometrische Auflösung zur Abbildung dieses Details im Radarintensitätsbild geringer als im Echtfarbenluftbild. Die gelben Markierungspfeile werden auf dem SAR-Intensitätenbild (links) dagegen nicht abgebildet, weil sich deren Reflektionscharakteristik nicht ausreichend von der des Asphalts unterscheidet.



Quelle: Eigene Grafik

Abbildung 103: Falluntersuchung Intermap STAR 3i IFSAR: Abbildung eines Windsacks im SAR-Intensitätsbild (X-Band, oben) und im Referenzbild (unten; Farbluftbild Flughafen Reno)

Quelle: Eigene Grafik

Abbildung 103 zeigt die Abbildung eines Windsackes im Radarintensitätsbild (X-Band, räumliche Auflösung ca. 2 m) und im Echtfarben-Luftbild als Referenz. Die räumliche Auflösung im Radarintensitätsbild ist nicht ausreichend, um den Windsack identifizieren zu können. Da Metalloberflächen starke Reflexion verursachen, kann ein helles Pixel in der Kreismitte zwar identifiziert werden; mittels der Abbildung kann jedoch keine Objektidentifizierung vorgenommen werden.

#### 8.4.3.3.5 Abgleich der Anforderungen mit Produktspezifikationen

Im Abgleich der Anforderungen an räumliche, spektrale und radiometrische Auflösung mit den Produktspezifikationen der in Tabelle 11 aufgeführten SAR-Sensoren wurden die Bereiche, welche die abgeleiteten Anforderungen erfüllen, hellgrün und solche, welche die Anforderungen nicht erfüllen, rot eingefärbt:

Sensor-System	Plattform	Räumliche Auflösung	Spektrale Auflösung	Radiometrische Auflösung
Intermap <b>STAR 3i</b> [Int2004]]	Flugzeug	Abhängig von der Flughöhe (bis zu 1 m)	X-Band.	8 bit
Aerosensing <b>AeS-1</b> [BLV2000]	Flugzeug	Abhängig von der Flughöhe (bis zu 0.5 m)	X-, P-Band	8 bit

Sensor-System	Plattform	Räumliche Auflösung	Spektrale Auflösung	Radiometrische Auflösung
CCRS <b>Radarsat</b> [ITC2005]	Satellit	6.25 -100 m	C-Band	8 bit
ESA <b>ERS 2</b> [ITC2005]	Satellit	30 m	C-Band	16 bit
ESA <b>ENVISAT</b> [ITC2005]	Satellit	30 – 150 m	C-Band	16 bit

Tabelle 22: Abgleich der Anforderungen mit Produktspezifikationen SAR-Fernerkundungssysteme

### Fazit

Keines der aufgeführten SAR-Sensorsysteme erfüllt die definierten Anforderungen bezüglich spektraler, räumlicher und radiometrischer Auflösung. Ausschlaggebend hierfür ist die Wellenlänge der Objektreflexionen im SAR-Intensitätsbild, welche ausserhalb des sichtbaren Bereichs liegt. Da nicht die Variation der spektralen Unterschiede von Objektreflexionen über einen weiten Spektralbereich aufgezeichnet wird, sondern die Intensität der Rückstrahlung innerhalb eines sehr engen Spektralbereiches ausserhalb des Spektralbereichs des sichtbaren Lichts (der Wellenlänge der Radarstrahlung), entspricht das aufgezeichnete Intensitätsbild nicht der natürlichen Wahrnehmung des Menschen und kann daher laut den hergeleiteten Anforderungen aus Kapitel 8.4.2.2 nicht zur Objektidentifizierung der definierten Flughafenobjekte, insbesondere der operationell kritischen Rollführungs- und Landebahnmarkierungen genutzt werden. Weiterhin erfüllt keiner der untersuchten Sensoren die definierten Anforderungen sowohl bezüglich räumlicher als auch radiometrischer Auflösung.

### 8.4.3.4 LIDAR

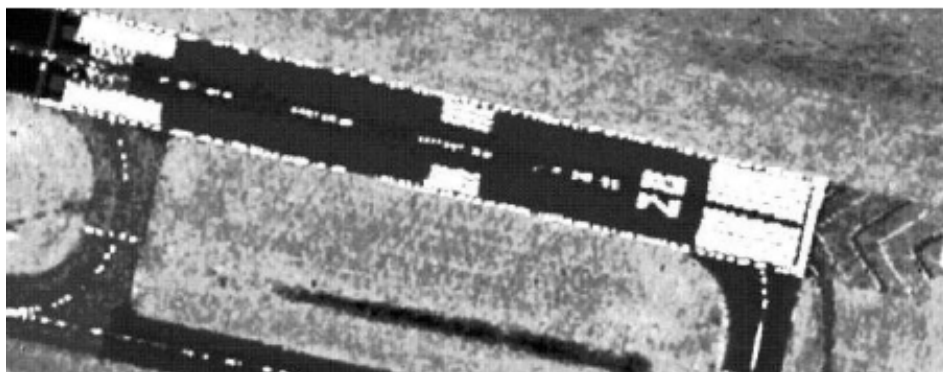
#### 8.4.3.4.1 Spektrale Auflösung

Ähnlich wie SAR-Radarsensoren senden LIDAR-Sensorsysteme gebündelte Strahlung in einem sehr schmalen Wellenlängenbereich aus. Der Wellenlängenbereich der Strahlung liegt jedoch im UV-, sichtbaren oder im nahen Infrarotbereich und nicht im Mikrowellenbereich. Der LIDAR-Sensor zeichnet nicht die Variation der Reflektion des Sonnenlichtes, wie passive Fernerkundungssensoren auf, sondern die Rückstrahlungsintensität in Bezug auf die genutzte Wellenlänge des Lasers. Die Darstellung der Objektreflexionen in LIDAR-Intensitätsbildern entspricht daher nicht der natürlichen Wahrnehmung des Menschen. Die Reflektionseigenschaft eines Objektes bezüglich der Wellenlänge der aktiven Laserstrahlung und die Differenz zur Reflektionsintensität von umgebenden Objekten entscheidet, ob es sich in der LIDAR-Intensitätsaufzeichnung von umgebenden Objekten unterscheiden lässt. Hierbei spielen die Oberflächenbeschaffenheit, die Oberflächenform und die elektrischen Eigenschaften des bestrahlten Objektes die entscheidende Rolle. Bei extrem glatten Flächen findet eine gerichtete Reflexion der Laserstrahlen statt, das Signal geht im Raum verloren oder trifft auf eine andere Oberfläche, von der es dann zum Empfänger als Falschsignal reflektiert wird. Ebenso existieren Flächen wie klare Gewässer, die das Signal absorbieren und ebenfalls keine Intensitätsmessung zulassen.

Weitere Faktoren, welche die Reflektionsintensität und damit die Objekterkennung im LIDAR-Intensitätsbild beeinflussen, sind

- Systemeigenschaften (Messfrequenz, Signalstärke, Laser-Wellenlänge).
- Detektor-Sensitivität und Rauschen.
- atmosphärische Zustände zum Messzeitpunkt: Durch Interaktion mit Dunst und Wasserdampfpartikeln kann der Laserstrahl gestreut werden.
- Sonneneinstrahlung und Messwinkel: Der LIDAR-Signalempfänger kann durch starke Sonnenreflektion von einem stark reflektierenden Objekt „gesättigt“ werden; d.h. das reflektierte Sonnenlicht wird fälschlicherweise als rückkehrendes Lasersignal interpretiert.

[Bal1999] [Opt2005]



Quelle: [Opt2004]

Abbildung 104: Abbildung einer Landebahn im Laser-Intensitätsbild (Laser Pulse Frequenz 10 kHz, Scan Frequenz 24 Hz, Flughöhe 500m AGL)

Abbildung 104 zeigt die LIDAR-Intensitätsabbildung einer Landebahn. Es lassen sich Landebahn, Rollwege, Rollweg- und Landebahnmarkierungen sowie Rollhaltemarkierungen eindeutig identifizieren; die Wiedergabe als Echtfarbenbild mit der Möglichkeit zur

Farbunterscheidung von z.B. Rolllinienelementen ist jedoch im LIDAR-Intensitätenbild nicht gegeben.

#### **8.4.3.4.2 Radiometrische Auflösung**

Recherchen bei verschiedenen Herstellern von LIDAR-Systemen ergaben eine radiometrische Auflösung von LIDAR-Intensitätsbildern von 8 bis 12 bit (256 -4096 Farbstufen).

#### **8.4.3.4.3 Räumliche Auflösung**

Die erreichbare räumliche Auflösung von LIDAR-Intensitätsbildern wird zunächst durch die Messpunktdichte beschrieben. Im rechten Winkel zur Flugrichtung ist diese abhängig von der Pulsfrequenz des Lasers, in Flugrichtung wird sie durch die Fluggeschwindigkeit kontrolliert. Sowohl in Flugrichtung als auch quer zur Flugrichtung kann die Punktdichte durch die Flughöhe kontrolliert werden.

Der Abstand der Messpunkte senkrecht zur Flugrichtung verändert sich in Abhängigkeit vom Scanwinkel. Da das LIDAR-Messprinzip auf der diskreten Einzelpunktmessung beruht, ist es nicht möglich, eine geschlossene Fläche ohne Lücken aufzunehmen. Wird die Pulsfrequenz des Lasers erhöht, kann die Messpunktdichte jedoch so stark erhöht werden, dass selbst kleine Objekte noch aufgezeichnet werden. Punktdichten von unter 0.1 m sind erreichbar. Im Intensitätsbild sind hierdurch räumliche Auflösungen von unter 0.6 m zu erreichen [Lei2006]. Bei adäquater Wahl der Pulsfrequenz, der Fluggeschwindigkeit und der Flughöhe können LIDAR-Intensitätsbilder die Anforderungen an die räumliche Auflösung daher erfüllen.

#### **8.4.3.4.4 Falluntersuchung: Optech ALTM 2050**

In der folgenden Falluntersuchung wird der Optech ALTM 33KHz LIDAR bezüglich seiner Abbildungsparameter zur Gewährleistung der Vollständigkeit von Flughafendatenbanken untersucht.



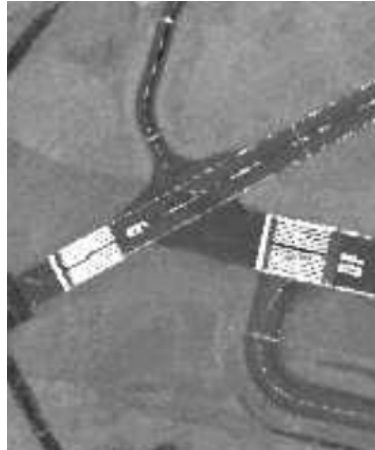
LIDAR Intensitätsbild des Gainesville Regional Airports, aufgenommen aus 1200 m Höhe mit Optech ALTM -33 kHz System

Quelle: [NGS2001]

Abbildung 105: Falluntersuchung Optech ALTM 33KHz LIDAR



In der LIDAR Intensitätsdarstellung des Gainesville Regional Airport in Abbildung 105 lassen sich wesentliche Objekte wie z.B. Rollflächen und Landebahnen sowie Runwaymarkierungen erkennen. Bei den tiefschwarzen Flächen handelt es sich um Asphaltflächen mit geringer bzw. keiner Rückstrahlung. Selbst Rollführungslinien und Haltemarkierungen können eindeutig identifiziert werden, wie Abbildung 106 zeigt.



Quelle: [NGS2001]

Abbildung 106: Falluntersuchung Optech ALTM 2050: Detailausschnitt Gainesville Regional Airport

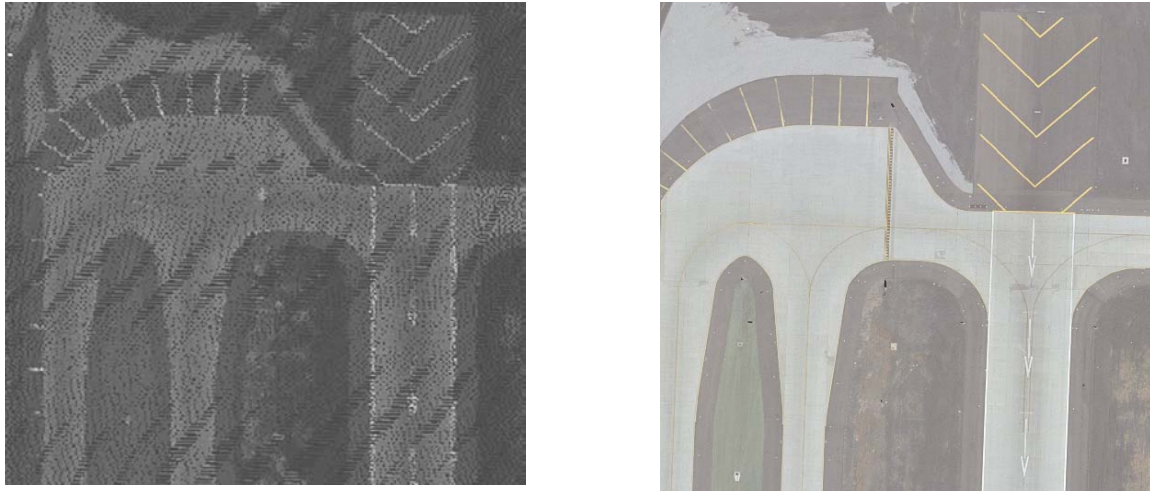
Da jedoch keine spektralen Variationen im sichtbaren Bereich aufgezeichnet werden, sondern Rückstrahlungsintensitäten bezüglich der genutzten Laser-Wellenlänge, kann keine farbliche Unterscheidung von Rollführungslinien vorgenommen werden. Hierdurch kann es zu Fehlklassifikationen bei der Objektaufnahme kommen.



Quelle: Eigene Grafik

Abbildung 107: Falluntersuchung Optech ALTM 2050: LIDAR Intensitätsbild Flughafen Reno, aufgenommen in 1200m Flughöhe

In der LIDAR-Intensitätsabbildung des Flughafens Reno, Nevada, können ebenfalls Rollflächen und Landebahnen sowie Runwaymarkierungen erkannt werden. Objekte mit geringerer Ausdehnung, wie z.B. Rollführungslinien, werden aufgrund auftragsabhängiger grösserer Flughöhe und damit geringerer Punktdichte jedoch nicht abgebildet.



Quelle: Eigene Grafik

Abbildung 108: Falluntersuchung Optech ALTM 2050: LIDAR Intensitätsbild Flughafen Reno (links) und Referenzbild (rechts; Farbluftbild Flughafen Reno)

Abbildung 108 zeigt die Kreuzung von Landebahn 16R mit Rollweg A auf dem Flughafen von Reno, Nevada. Die weissen Landebahnmarkierungen sowie die gelben Markierungen der Rollwegschulter sowie des Blastpads sind deutlich zu erkennen, können jedoch aufgrund ihrer ähnlichen spektralen Ausprägung im LIDAR-Intensitätsbild nicht farblich unterschieden werden.

#### 8.4.3.4.5 Abgleich der Anforderungen mit Produktspezifikationen

Im Abgleich der Anforderungen an räumliche, spektrale und radiometrische Auflösung mit den Produktspezifikationen der in Tabelle 12 aufgeführten LIDAR-Sensoren wurden die Bereiche, welche die abgeleiteten Anforderungen erfüllen, hellgrün und solche, die die Anforderungen nicht erfüllen, rot eingefärbt:

Sensor-system	Plattform	Räumliche Auflösung	Spektrale Auflösung	Radiometrische Auflösung
Optech <b>ALTM 3100EA</b> [Opt2006]	Flugzeug	< 0.6 m	1064nm.	12bit
Leica <b>ALS50</b> [Lei2006]	Flugzeug	< 0.6 m	1064 nm	8 bit
Riegl <b>LMS-Q560</b> [Rie2006]	Flugzeug	< 0.6 m	Nahes Infrarot	16 bit

Tabelle 23: Abgleich der Anforderungen mit Produktspezifikationen LIDAR-Fernerkundungssysteme

## **Fazit**

Keines der aufgeführten LIDAR-Sensorsysteme erfüllt die definierten Anforderungen bezüglich spektraler Auflösung. Obwohl ähnlich wie beim SAR-Intensitätsbild auch beim LIDAR-Intensitätsbild nicht die Variation der spektralen Unterschiede von Objektreflectionen über einen weiten Spektralbereich aufgezeichnet wird, sondern die Intensität der Rückstrahlung innerhalb eines sehr engen Spektralbereiches (der Wellenlänge des Lasers), entspricht das aufgezeichnete Intensitätsbild viel mehr einer panchromatischen Aufzeichnung des sichtbaren Bereiches z.B. durch ein Luftbild und damit auch mehr der natürlichen Wahrnehmung des Menschen. Laut den hergeleiteten Anforderungen aus Kapitel 8.4.2.2 kann jedoch wegen fehlender Abbildung von Objektfarben keine Objektunterscheidung insbesondere der operationell kritischen Rollführungs- und Landebahnmarkierungen vorgenommen werden. LIDAR eignet sich hiermit nicht zum Gewährleistung der Vollständigkeit von Flughafendatenbanken.

### **8.4.4 Zusammenfassung und Beurteilung der Ergebnisse**

Mittels fernerkundlicher Methoden können lediglich solche Objekte erfasst und extrahiert werden, welche für den spezifischen Sensor auch „sichtbar“ sind. Objekte mit fiktiver räumlicher Ausprägung (Frequency Area, Aerodrome Reference Point, Deicing Area und Construction Area) können nicht eingemessen werden. Diese Informationen liegt ausschliesslich in Aerodrome/Heliport Chart ICAO vor und muss hieraus abgeleitet werden.

#### **Chemo-optische Sensoren**

Bei chemo-optischen Sensoren ist die räumliche Auflösung abhängig insbesondere von der Flughöhe (bzw. Umlaufbahn bei satellitengestützten Sensoren) und dem optischen Auflösungsvermögens des Filmes. Für alle untersuchten flugzeuggestützten Sensoren konnte eine erforderliche Auflösung von  $<0.6$  m bei adäquater Wahl des Luftbildfilmes und der Flughöhe erreicht werden.

Die spektrale Auflösung chemo-optischer Sensoren wird durch den Film bestimmt. Die spektrale Auflösung von Luftbild-Farbfilmen entspricht den Anforderungen zur Abbildung des sichtbaren Spektralbereichs in Echtfarben.

Die radiometrische Auflösung wird ebenfalls durch den Film bestimmt, kann im Gegensatz zu elektronischen/digitalen Verfahren jedoch nicht genau bestimmt werden. Sie ist jedoch ausreichend hoch, um auch bei schlechten Beleuchtungssituationen noch Objekte mit ähnlicher spektraler Reflektionscharakteristik voneinander unterscheiden zu können.

Alle untersuchten flugzeuggestützte chemo-optische Sensoren erfüllen die gestellten Anforderungen an räumliche, spektrale und radiometrische Auflösung bei der adäquaten Auswahl des Luftbildfilms (Farbfilm, hohes optisches Auflösungsvermögen) und der Flughöhe. Lediglich ein satellitengestützter Sensor erfüllt wegen seiner hohen Flughöhe, der hieraus resultierenden geringeren räumlichen Auflösung sowie der geringen spektralen Auflösung wegen Nutzung eines panchromatischen Films die Anforderungen an spektrale und räumliche Anforderungen nicht.

In Kombination mit Aerodrome/Heliport Chart ICAO zum Extrahieren von Objekten mit fiktiver räumlicher Ausprägung kann durch flugzeuggestützte chemo-optische Sensoren die Anforderungen an Vollständigkeit nach RTCA Do-272a gewährleistet werden.

#### **Elektro-optische Sensoren**

Bei elektro-optischen Sensoren ist die räumliche Auflösung abhängig von der Flughöhe, der Anzahl an CCD-Elementen pro Zeile und der Brennweite der Optik. Je niedriger die Flughöhe und je größer die Anzahl an CCDs für einen durch die Brennweite der Optik

bestimmten *Field of View*, desto höher die räumliche Auflösung. Während die Anzahl an CCD-Elementen pro Zeile sowie die Optik Sensorsystem-spezifisch ist, kann durch Anpassung der Flughöhe die benötigte räumliche Auflösung erreicht werden. Dies gilt allerdings nur für flugzeuggestützte Sensoren; bei satellitengestützten Sensoren sind alle drei Faktoren als Konstanten anzusehen. Daher erfüllen auch nur die flugzeuggestützten elektro-optischen sowie zwei höchstauflösende satellitengestützte Sensorsysteme die definierten Anforderungen bezüglich räumlicher Auflösung.

Die definierte Anforderung an die spektrale Auflösung wird durch so genannte Multispektralscanner erfüllt, die den Spektralbereich des sichtbaren Lichtes durch drei Farbkanäle rot, grün und blau abdecken. Durch Kombination der drei Farbkanäle zu einem Echtfarbenbild kann die Anforderung an naturgetreue farbliche Darstellung entsprechend der menschlichen Wahrnehmung erfüllt werden. Dies ist bei allen untersuchten elektro-optischen Sensorsystemen der Fall.

Die meisten opto-elektronischen Zeilenscanner arbeiten mit 8 bit – 11 bit Farbtiefe pro Kanal, unterscheiden also 256 bis 2048 Grauwertstufen. Zur Erstellung eines Echtfarbenbildes des sichtbaren Bereiches werden die Spektralbereiche der Farben blau, grün und rot in getrennten Kanälen mit jeweils 8 bit – 11 bit radiometrischer Auflösung aufgezeichnet und kombiniert. Das resultierende Echtfarbenbild besitzt eine Farbtiefe von  $3 \times 8 - 11$  bit, entsprechend 16.7 Mio. bis 8589 Mio. Farben. Die Anforderung an die radiometrische Auflösung werden demnach von Multispektralscannern, welche den Bereich des sichtbaren Lichtes mit drei Einzelkanälen mit jeweils mindestens 8bit radiometrischer Auflösung abdecken, erfüllt.

Alle untersuchte flugzeuggestützte elektro-optischen Sensorsysteme erfüllen die gestellten Anforderungen an räumliche, spektrale und radiometrische Auflösung. Wegen des grossen Abstandes zur Erdoberfläche bieten die meisten satellitengestützten Sensorsysteme nicht die erforderliche räumliche Auflösung. Die höchstauflösenden satellitengestützten Sensoren GeoEye-1, Worldview-1 als auch Quickbird-2 erreichen die erforderliche räumliche Auflösung, jedoch lediglich für den panchromatischen Kanal (Quickbird-2 hier nur bei einer Nadirabbildung). Durch das *pansharpening*, einer nachträglichen Verbesserung der räumlichen Auflösung eines Echtfarbenbildes durch Kombination des höchstauflösenden panchromatischen Kanals mit den drei niedriger auflösenden Farbkanälen können sowohl GeoEye-1 als auch Quickbird-2 die Anforderung an räumliche als auch an spektrale Auflösung erfüllen. Worldview-1 besitzt lediglich einen panchromatischen Kanal und kann daher die Anforderungen an spektrale Auflösung nicht erfüllen.

In Kombination mit Aerodrome/Heliport Chart ICAO zum Extrahieren von Objekten mit fiktiver räumlicher Ausprägung können alle flugzeuggestützten elektro-optischen Sensoren sowie die satellitengestützten Sensoren GeoEye-1 und Quickbird-2 die Anforderungen an Vollständigkeit nach RTCA Do-272a gewährleisten.

### **SAR Sensoren**

Die räumliche Auflösung von Radarintensitätsbildern hängt von den Eigenschaften der Mikrowellenstrahlung und den geometrischen Effekten ab. Die Auflösung quer zur Flugrichtung (Range) hängt von der Pulslänge der Mikrowellenfront sowie dem Depressionswinkel ab. Die Auflösung in Flugrichtung (Azimut) hängt von dem räumlichen Abstrahlwinkel in Flugrichtung, der Entfernung zum Aufnahmeobjekt und der Größe der Antenne ab. Gängige Auflösungen von satellitengestützten SAR-Systemen liegen im 10m bis 100m Bereich, der von flugzeuggestützten Systemen im 1.25m – 5 m Bereich. Hiermit erfüllen weder satellitengestützte noch flugzeuggestützte Systeme die Anforderungen an die räumliche Auflösung.

Die spektrale Auflösung eines SAR-Sensors beschränkt sich auf einen sehr kleinen Bereich des Frequenzspektrums des Mikrowellenbereich. Im Gegensatz zu passiven Fernerkundungssensoren zeichnen SAR-Sensoren nicht die Variation der spektralen

Unterschiede von Objektreflexionen über einen weiten Spektralbereich auf, sondern die Intensität der Rückstrahlung in Bezug auf den genutzten Spektralbereich (der Wellenlänge der Radarstrahlung). Das aufgezeichnete Intensitätsbild entspricht nicht der natürlichen Wahrnehmung des Menschen und kann daher laut den definierten Anforderungen nicht zur Objektidentifizierung der definierten Flughafenobjekte genutzt werden.

Die radiometrische Auflösung beträgt in den betrachteten Sensorsystemen zwischen 8-16 bit (256 – 65536 Farbstufen). Damit erfüllt nur ein Teil der betrachteten Sensorsysteme die definierten Anforderungen.

Keines der aufgeführten SAR-Sensorsysteme erfüllt also die definierten Anforderungen bezüglich spektraler, räumlicher und radiometrischer Auflösung und kann somit die Anforderungen an Vollständigkeit nach RTCA Do-272a nicht gewährleisten.

### LIDAR Sensoren

Die räumliche Auflösung von LIDAR-Intensitätsbildern hängt quer zur Flugrichtung von der Pulsfrequenz des Lasers, in Flugrichtung von der Fluggeschwindigkeit ab. Sowohl in Flugrichtung als auch quer zur Flugrichtung kann die Punktdichte durch die Flughöhe kontrolliert werden. Lediglich die Pulsfrequenz des Lasers ist sensorsystemspezifisch. Die anderen Faktoren sind variabel und können den Anforderungen gemäß angepasst werden, um die erforderliche räumliche Auflösung zu erzielen. Alle im Rahmen der Untersuchung betrachteten LIDAR-Sensorsysteme erfüllen die definierten Anforderungen an die räumliche Auflösung.

Die radiometrische Auflösung von LIDAR ist sensorsystemspezifisch. Recherchen bei verschiedenen Herstellern von LIDAR-Systemen ergaben eine radiometrische Auflösung von LIDAR-Intensitätsbildern von 8 bis 12 bit (256 -4096 Farbstufen). Damit erfüllt nur ein Teil der betrachteten Systeme die definierte Anforderung an radiometrische Auflösung.

Ähnlich wie SAR-Radarsensoren senden LIDAR-Sensorsysteme gebündelte Strahlung in einem sehr schmalen Wellenlängenbereich aus. Der Wellenlängenbereich der Strahlung liegt jedoch im UV-, sichtbaren oder im nahen Infrarotbereich. Der LIDAR-Sensor zeichnet die Rückstrahlungsintensität in Bezug auf die genutzte Wellenlänge des Lasers auf. Daher entspricht die Darstellung der Objektreflexionen in LIDAR-Intensitätsbildern nicht der natürlichen Wahrnehmung des Menschen und kann daher laut den definierten Anforderungen nicht zur Objektidentifizierung der definierten Flughafenobjekte genutzt werden. Keines der aufgeführten LIDAR-Sensorsysteme erfüllt also die definierten Anforderungen bezüglich spektraler, räumlicher und radiometrischer Auflösung und kann somit die Anforderungen an Vollständigkeit nach RTCA Do-272a nicht gewährleisten.

Tabelle 24 zeigt eine Übersicht der betrachteten Sensorsysteme, das Erfüllen der Anforderungen an räumliche, spektrale und radiometrische Auflösung sowie der Eignung zum Erstellen von Flughafendatenbanken in Hinblick auf das Datenqualitätsmerkmal Vollständigkeit.

Sensor	System	Plattform	Räumliche Auflösung.	Spektrale Auflösung	Radiom. Auflösung	Eignung
Chemo-optisch	<b>Leica</b>	Flugzeug	Erfüllt	Erfüllt	Erfüllt	Erfüllt
	RC-20, -30					
	<b>Carl Zeiss</b>	Flugzeug	Erfüllt	Erfüllt	Erfüllt	Erfüllt
	LMK 1015, 15/23					
	RMK 1TOP, 15/23					

Sensor	System	Plattform	Räumliche Auflösung	Spektrale Auflösung	Radiom. Auflösung	Eignung
	<b>KVR 1000</b>	Satellit	Nicht Erfüllt	Nicht Erfüllt	Erfüllt	<b>Nicht Erfüllt</b>
Elektro-optisch	DLR <b>HRSC-A</b>	Flugzeug	Erfüllt	Erfüllt	Erfüllt	<b>Erfüllt</b>
	Leica <b>ADS-40</b>	Flugzeug	Erfüllt	Erfüllt	Erfüllt	<b>Erfüllt</b>
	GeoEye <b>Ikonos 2</b>	Satellit	Nicht Erfüllt	Erfüllt	Erfüllt	<b>Nicht Erfüllt</b>
	GeoEye <b>GeoEye-1</b>	Satellit	Erfüllt	Erfüllt	Erfüllt	<b>Erfüllt</b>
	DigitalGlobe <b>Quickbird-2</b>	Satellit	Erfüllt (Nadir- aufnahme)	Erfüllt	Erfüllt	<b>Erfüllt</b>
	DigitalGlobe <b>WorldView-1</b>	Satellit	Erfüllt	Nicht Erfüllt	Erfüllt	<b>Nicht Erfüllt</b>
	ImageSat Int. <b>EROS A</b>	Satellit	Nicht Erfüllt	Nicht Erfüllt	Erfüllt	<b>Nicht Erfüllt</b>
	ImageSat Int. <b>EROS B</b>	Satellit	Nicht Erfüllt	Nicht Erfüllt	Nicht Erfüllt	<b>Nicht Erfüllt</b>
	<b>IRS P6</b>	Satellit	Nicht Erfüllt	Nicht Erfüllt	Erfüllt	<b>Nicht Erfüllt</b>
	<b>SPOT 5</b>	Satellit	Nicht Erfüllt	Erfüllt	Erfüllt	<b>Nicht Erfüllt</b>
	<b>Landsat 7</b>	Satellit	Nicht Erfüllt	Erfüllt	Erfüllt	<b>Nicht Erfüllt</b>
SAR	Intermap <b>STAR 3i</b>	Flugzeug	Nicht Erfüllt	Nicht Erfüllt	Nicht Erfüllt	<b>Nicht Erfüllt</b>
	Aerosensing <b>AeS-1</b>	Flugzeug	Erfüllt	Nicht Erfüllt	Nicht Erfüllt	<b>Nicht Erfüllt</b>
	CCRS <b>Radarsat</b>	Satellit	Nicht Erfüllt	Nicht Erfüllt	Nicht Erfüllt	<b>Nicht Erfüllt</b>
	ESA <b>ERS 2</b>	Satellit	Nicht Erfüllt	Nicht Erfüllt	Erfüllt	<b>Nicht Erfüllt</b>

Sensor	System	Plattform	Räumliche Auflösung.	Spektrale Auflösung	Radiom. Auflösung	Eignung
	ESA <b>ENVISAT</b>	Satellit	Nicht Erfüllt	Nicht Erfüllt	Erfüllt	<b>Nicht Erfüllt</b>
<b>LIDAR</b>	Optech <b>ALTM 3050EA</b>	Flugzeug	Erfüllt	Nicht Erfüllt	Erfüllt	<b>Nicht Erfüllt</b>
	Leica <b>ALS50</b>	Flugzeug	Erfüllt	Nicht Erfüllt	Nicht Erfüllt	<b>Nicht Erfüllt</b>
	Riegl <b>LMS-Q560</b>	Flugzeug	Erfüllt	Nicht Erfüllt	Erfüllt	<b>Nicht Erfüllt</b>

Tabelle 24: Übersicht der Eignung der untersuchten Sensorsysteme bzgl. der Eignung zum Gewährleisten der Vollständigkeit von Flughafendatenbanken

Von 20 untersuchten Sensorsystemen erfüllen nur fünf die definierten Anforderungen. Der Erfolg dieser fünf Systeme kann durch folgende Faktoren beschrieben werden:

1. geringe Flughöhe
2. Aufzeichnen des sichtbaren Spektralbereichs als Echtfarnebild

Der Faktor der geringen Flughöhe wird bestimmt durch die Anforderung an hohe räumliche Auflösung. Dies schränkt natürlich die Auswahl an Sensorsystemen deutlich ein: Alle satellitengestützte Systeme außer GeoEye-1, Quickbird-2 und WorldView-1 erfüllen wegen ihrer hohen Flughöhe nicht die Anforderung an räumliche Auflösung; Quickbird 2 jedoch auch nur im Idealfall der Nadiraufnahme. Die hohe Anforderung an die räumliche Auflösung wurde durch die geringe Oberfläche von *Vertical Point Objects* bestimmt (siehe Kapitel 8.4.2.3). Würde eine Flughafendatenbank ohne *Vertical Point Objects* erstellt, beträgt die Anforderung an die räumliche Auflösung nur 1m. In diesem Fall erfüllte dann auch der höchstauflösende Satellit IKONOS-II die Anforderungen an spektrale, räumliche und radiometrische Auflösung.

Der zweite Faktor, Aufzeichnen des sichtbaren Spektralbereichs als Echtfarnebild, schließt von vorneherein die Nutzung von aktiven Sensorsystemen (SAR, LIDAR) aus, da lediglich chemo-optische und elektro-optische Systeme diese Anforderung erfüllen können. Es liegt jedoch grosses Potential in der parallelen Nutzung von aktiven und passiven Sensorsystemen, insbesondere von LIDAR\_Sensoren, welche die Anforderungen an räumliche und radiometrische Auflösung erfüllen, und flugzeuggestützten elektro-optischen Sensorsystemen. Besonders zur Identifizierung von *Vertical Point Objects*, wie z.B. Masten und Antennen, bietet die zusätzliche Nutzung von LIDAR hohes Potential zum Gewährleisten der Vollständigkeit, da aufgrund der materialspezifischen Reflektionscharakteristik diese Objekte besonders stark reflektieren und sich daher deutlich von der umgebenden Oberfläche absetzen als auf einem Luftbild. Die Objektidentifizierung (z.B. Mast oder Antenne) muss dann jedoch aus dem Kontext eines Echtfarnebildes erfolgen, da das LIDAR-Intensitätsbild wegen der unnatürlichen Darstellung hierzu nicht die notwendige Information liefert.

Auch bezüglich der nutzbaren elektro-optischen satellitengestützten Systeme liefert die Anforderung, den sichtbaren Spektralbereich als Echtfarnebild aufzuzeichnen, ein Ausschlusskriterium für viele Sensoren. Insbesondere der räumlich höchstauflösende Sensor

WorldView-1 kann wegen nicht ausreichender spektraler Auflösung daher nicht die benötigte Datenbasis zum Erstellen von Flughafendatenbanken nach RTCA Do-272a liefern.



## 8.5 Analyse der Positionsgenauigkeit

Zum Erstellen von Flughafendatenbanken basierend auf fernerkundlichem Bildmaterial müssen folgende Arbeitsschritte durchlaufen werden:

1. Akquisition des Bildmaterials
2. Radiometrische Korrektur
3. Geometrische Korrektur und Georeferenzierung des Bildmaterials
4. Extraktion der Flughafendatenbank-Vektorobjekte aus dem Fernerkundungsbild

Je nach Sensortyp können sich die Arbeitsschritte im Detail voneinander unterscheiden.

Neben den sensorspezifischen Eigenschaften beeinflussen die gewählte Methode der geometrischen Korrektur und Georeferenzierung sowie die Qualität der Extraktion der Flughafendatenbank-Vektorobjekte entscheidend die Positionsgenauigkeit der Flughafendatenbank.

### 8.5.1 Vorgehensweise

Die Evaluierung der Fernerkundungsverfahren bezüglich der in Tabelle 6 definierten Anforderungen an die horizontale Positionsgenauigkeit findet anhand des Positionsfehlers der auf Basis der Fernerkundungsdaten generierten Vektorobjekte statt. Der Positionsfehler der Vektorobjekte resultiert aus dem Positionsfehler des Fernerkundungsbildes nach der Georeferenzierung und dem vom Operator induzierten Positionsfehler während der Objektextraktion.

Da die Vorgehensweise zur manuellen, visuellen Extraktion von Vektordaten aus einer Fernerkundungsszene unabhängig ist von dem Fernerkundungs-Sensortyp, ist auch der hierdurch induzierte Positionsfehler hiervon unabhängig. Daher wird zunächst der induzierte Positionsfehler bei der Objektextraktion isoliert und zur Evaluierung der verschiedenen Fernerkundungsverfahren die horizontale Positionsgenauigkeit eines Fernerkundungsbildes nach der Georeferenzierung betrachtet.

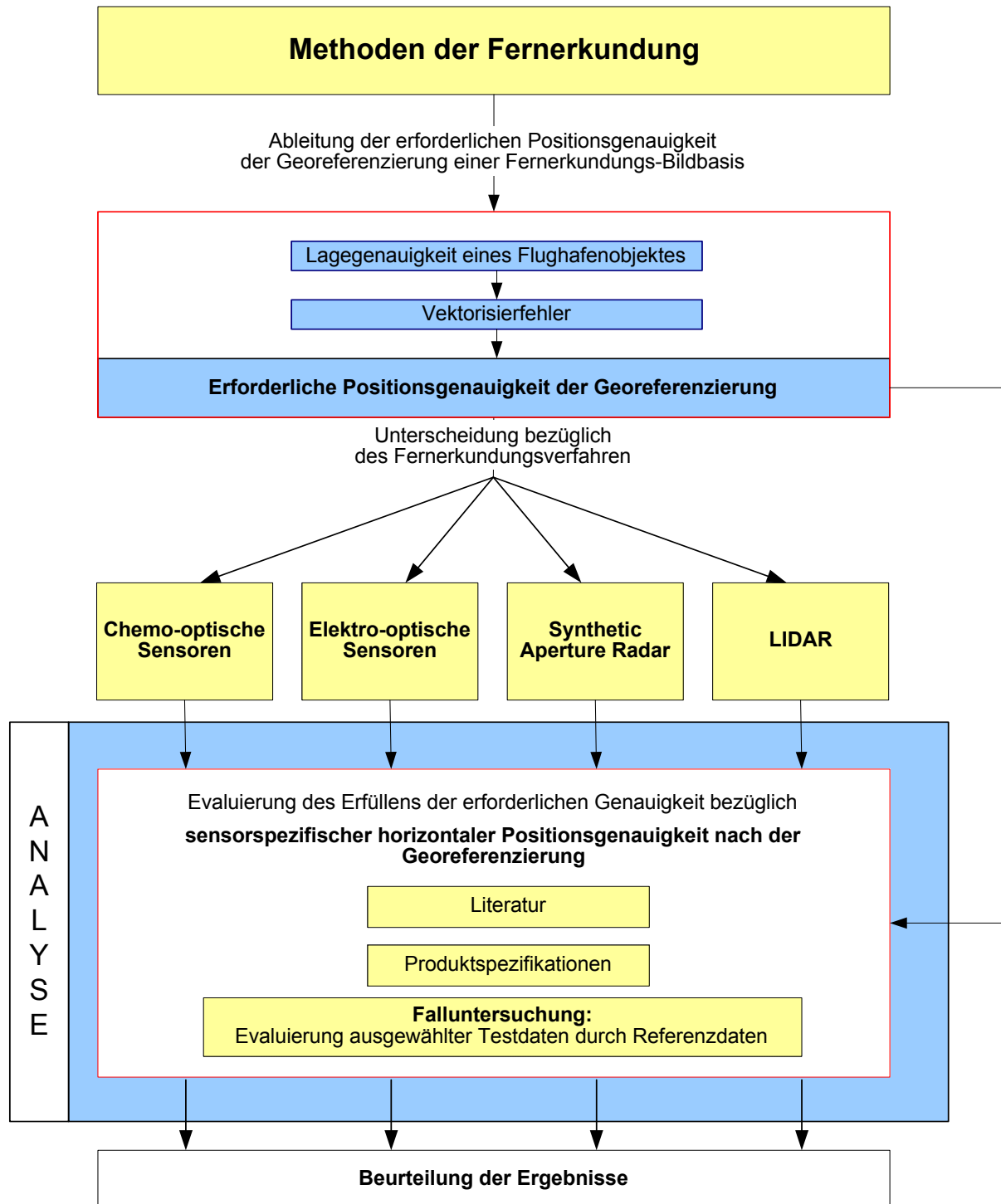
Hierzu wird im ersten Schritt basierend auf den in Tabelle 6 definierten Positionsgenauigkeitsanforderungen nach RTCA Do-272a „Medium“ die Anforderungen an die Positionsgenauigkeit des Fernerkundungsbildes nach der Georeferenzierung abgeleitet.

Im nächsten Schritt wird evaluiert, ob die verschiedenen betrachteten Fernerkundungssensortypen die abgeleitete Anforderung erfüllen. Diese Evaluierung erfolgt sensortypspezifisch für verschiedene ausgewählte Sensoren durch Literaturanalyse sowie Produktspezifikationen. In individuellen Falluntersuchungen der Flughäfen

- Stuttgart
- Augsburg
- Hamburg
- Frankfurt
- Reno, Nevada
- Abbotsford, Kanada
- Seattle Boeing Field
- Moses Lake, Washington
- Everett, Washington

- Renton, Washington
- Seattle Tacoma, Washington

(siehe Tabelle 7) wird die Relevanz des Ergebnis anhand Referenzdaten überprüft. Abschließend erfolgt eine Zusammenfassung und Beurteilung der Ergebnisse.



Quelle: Eigene Grafik

Abbildung 109: Vorgehensweise zur Evaluierung der Positionsgenauigkeit von Fernerkundungssensoren

### 8.5.2 Ableitung der erforderlichen Positionsgenauigkeit der Georeferenzierung einer Fernerkundungs-Bildbasis

Im Rahmen der Analyse zur Nutzbarkeit von Methoden der Fernerkundung zum Erstellen von Flughafendatenbanken nach RTCA Do-272a werden, wie in Kapitel 1.1 erläutert, lediglich manuelle Vektorextraktionsverfahren betrachtet; vollautomatische bzw. halbautomatische Verfahren werden nicht untersucht.

Der horizontale Positionsfehler von Flughafendatenbank-Vektorobjekten, visuell extrahiert aus einer fernerkundlichen Bildbasis, setzt sich zusammen aus

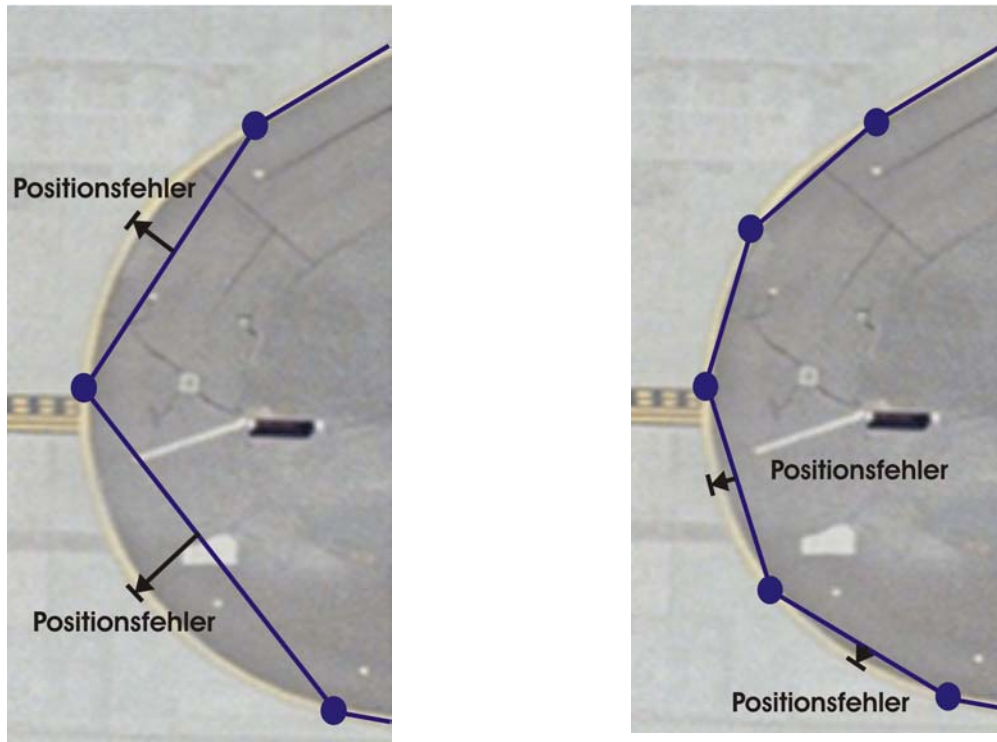
- dem Positionsfehler der georeferenzierten Fernerkundungsbilder ( $\sigma_{\text{Georeferenzierung}}$ ).
- dem induzierten Positionsfehler bei der geometrischen Approximation von Kreissegmenten durch Liniensegmente während der Vektorextraktion aus einem Fernerkundungsbild ( $\sigma_{\text{Kreissegment}}$ ).
- dem induzierten Positionsfehler der geometrischen Approximation von Objekten während der Vektorextraktion durch inkorrektes Setzen der Knoten und Vertices  
 $\sigma_{\text{Vektorextraktion}}$

Bei der Extraktion von Flughafendatenbank-Objekten aus einer Fernerkundungsbild müssen linien- bzw. flächenförmige Objekte mittels Start- und Endknoten sowie durch von Zwischenvertices definierte Strecken aufgenommen werden (siehe Kapitel 1.1). Flughafenobjekte mit gerader Aussenseite und spitz- oder stumpfwinkliger Richtungsänderung (z.B. Runway) können hierdurch sehr lagegenau extrahiert werden. (siehe Abbildung 124, rechte Seite).

Erfahrungswerte zeigen jedoch, dass die wenigsten Objekte einer Flughafendatenbank gerade Aussenseiten aufweisen. Bei Objekten mit gebogener Aussenseite (z.B. kurvenförmige Taxi Guidance Lines und äussere Begrenzungen von Rollwegen) müssen die Vertices adäquat gewählt werden, um die räumliche Ausprägung des Objekts geometrisch zu approximieren, da eine teilweise oder gesamte Extraktion als Kreisbogen nach der Definition des Datenkatalogs und des Datenaustauschformats für Flughafendatenbanken nicht zulässig ist [Do-272a], [Do291].

Ziel der Objektextraktion ist die lagegenaue geometrische Approximation eines Objektes, und somit den induzierten Positionsfehler der geometrischen Approximation von Kreissegmenten durch Liniensegmente ( $\sigma_{\text{Kreissegment}}$ ) einzuschränken. Je höher die Krümmung, desto geringer muss der Abstand zwischen den Zwischenvertices gewählt werden, um  $\sigma_{\text{Kreissegment}}$  einzuschränken. Spezielle Anforderungen zur Minimierung der Anzahl an Zwischenvertices können z.B. seitens der Endanwendung zur Performanceoptimierung definiert werden, sollen aber hier nicht berücksichtigt werden.

Abbildung 110 zeigt den unterschiedlichen induzierten Positionsfehler  $\sigma_{\text{Kreissegment}}$  bei der geometrischen Approximation von Kreissegmenten durch Liniensegmente am Beispiel eines Rollweg-Objektes bei geringem und grossem Abstand der Zwischenvertices:



Quelle: Eigene Grafik

Abbildung 110: Induzierter Positionsfehler bei der Vektorextraktion von Kreissegmenten durch Liniensegmente aus einem Fernerkundungsbild: Links grosser Abstand der Zwischenvertices, rechts geringer Abstand

$\sigma_{\text{Kreissegment}}$  des Rollwegobjektes auf der linken Seite ist wegen des größeren Abstands der Vertices und der dadurch größeren Abweichung vom Kreisbogen deutlich größer als auf der rechten Seite, wo der Abstand geringer gewählt wurde. Dieser induzierte Positionsfehler wird dem Operator bereits während der Objektextraktion durch Overlay des Vektorobjektes auf die Fernerkundungsszene dargestellt, so dass eine Bestimmung und Begrenzung des induzierten Positionsfehlers stattfinden kann. Für Flughafenobjekte mit gebogenen Außenseiten wird  $\sigma_{\text{Kreissegment}}$  mit 0.3m abgeschätzt. Dieser Erfahrungswert hat in der Praxis gute Ergebnisse zur Wahrung der räumlichen Charakteristik von Flughafenobjekten geliefert, ohne die Menge an benötigten Vertices und damit das Datenvolumen unnötig zu erhöhen.

Die induzierte Positionsfehler  $\sigma_{\text{Vektorextraktion}}$  wird bei der geometrischen Approximation von Objekten während der Vektorextraktion durch inkorrektes Setzen der Knoten und Vertices bedingt [Bil1997]. Er ist abhängig von der räumlichen Auflösung der fernerkundlichen Bildbasis und liegt in der Größenordnung von einem Pixel [Fri1999]. Die Anforderung an die räumliche Auflösung eines Fernerkundungsbildes (der Pixelgröße), welche  $\sigma_{\text{Vektorextraktion}}$  beeinflusst, wurde in Kapitel 8.4.2.3 mit  $< 0.6\text{m}$  festgelegt. Daher wird  $\sigma_{\text{Vektorextraktion}}$  mit 0.6m festgelegt.

Sowohl  $\sigma_{\text{Kreissegment}}$  als auch  $\sigma_{\text{Vektorextraktion}}$  muss zur Ableitung der erforderlichen horizontalen Positionsgenauigkeit der fernerkundlichen Bildbasis nach der Georeferenzierung aus dem Gesamtfehlerbudget berücksichtigt werden:

$$\sigma_{\text{Vektorobjekt}} = \text{SQRT} (\sigma_{\text{Georeferenzierung}}^2 + \sigma_{\text{Kreissegment}}^2 + \sigma_{\text{Vektorextraktion}}^2)$$

Quelle: [Fri1999]

Formel 4: Komponenten des horizontalen Positionsfehlers von Flughafendatenbank-Vektorobjekten, extrahiert aus fernerkundlichem Bildmaterial

Daraus folgt zur Bestimmung des maximalen Positionsfehlers eines Fernerkundungsbildes nach der Georeferenzierung:

$$\sigma_{\text{Max Georeferenzierung}} = \text{SQRT} (\sigma_{\text{Min. Vektorobjekt}}^2 - \sigma_{\text{Vektorextraktion}}^2 - \sigma_{\text{Kreissegment}}^2)$$

Quelle: [Fri1999], abgeändert

Formel 5: Bestimmung des maximalen Positionsfehlers eines Fernerkundungsbildes nach der Georeferenzierung

$\sigma_{\text{Kreissegment}}$	<i>induzierter Positionsfehler bei der geometrischen Approximation von von Kreissegmenten durch Liniensegmente während der Vektorextraktion aus einem Fernerkundungsbild [m]</i>
$\sigma_{\text{Vektorextraktion}}$	<i>Induzierter Positionsfehler bei der geometrischen Approximation von Objekten während der Vektorextraktion durch inkorrektes Setzen der Knoten und Vertices [m]</i>
$\sigma_{\text{Max Georeferenzierung}}$	<i>Maximal zulässiger Positionsfehler der georeferenzierten Fernerkundungsbilder [m]</i>
$\sigma_{\text{Min. Vektorobjekt}}$	<i>Kleinster zulässiger Positionsfehler eines Vektorobjektes einer Flughafendatenbank [m] nach RTCA Do-272a „Medium“.</i>

Zur Berechnung des maximal zulässigen Positionsfehlers des georeferenzierten Fernerkundungsbildes wird zunächst der kleinste zulässige horizontale Positionsfehler aller Vektorobjekte einer Flughafendatenbank ( $\sigma_{\text{Min. Vektorobjekt}}$ ) identifiziert. Er wird durch das Flughafendatenbank-Vektorobjekt mit der höchsten Anforderung an horizontale Positionsgenauigkeit nach RTCA Do-272a „Medium“ vorgegeben (siehe Tabelle 6). Nach RTCA Do-272a „Medium“ benötigen alle Flughafendatenbank-Vektorobjekte eine horizontale Positionsgenauigkeit von 5m, ausgenommen dem *Aerodrome Reference Point* mit einer horizontalen Positionsgenauigkeit von 30m oder besser.  $\sigma_{\text{Min. Vektorobjekt}}$  wird daher mit 5 m festgelegt. Basierend auf Formel 5 folgt daher:

$$\sigma_{\text{Max Georeferenzierung}} = \text{SQRT} (5^2 - 0.6^2 - 0.3^2) = 4.95$$

Formel 6: Maximal zulässiger Positionsfehler des fernerkundlichen Bildes nach der Georeferenzierung

Der maximal zulässige Positionsfehler des fernerkundlichen Bildes nach der Georeferenzierung  $\sigma_{\text{Max Georeferenzierung}}$  beträgt demnach 4.95m.

Im folgenden wird evaluiert, ob die verschiedenen Fernerkundungsverfahren und Sensortypen eine fernerkundliche Bildbasis mit einer horizontalen Positionsgenauigkeit von 4.95m oder besser nach Georeferenzierung bereitstellen können.

### 8.5.3 Positionsgenauigkeit der Georeferenzierung

Unter Georeferenzierung versteht man das Erstellen des räumlichen Bezugs von Bildkoordinaten zu einem räumlichen Koordinatensystem. Je nach gewähltem räumlichen Koordinatensystem wird die räumliche Lage der Bildpunkte in globalen Koordinatensystemen durch geographische Länge und Breite auf der Erdoberfläche oder in lokalen Systemen durch Distanzen zu einem Bezugsmeridian und Breitengrad definiert.

Es lassen sich zwei Verfahren zur Georeferenzierung von Fernerkundungsdaten unterscheiden:

- A. Direkte Georeferenzierung
- B. Indirekte Georeferenzierung

Bei der direkten Georeferenzierung werden die Sensoren (Luftbildkamera, Pushbroomscanner, SAR, LIDAR) mittels differenziellem GPS und hochgenauer Inertialsysteme im Raum orientiert. Die Inertial Measurement Unit (IMU) an den Aufnahmesensoren registriert zum Aufnahmezeitpunkt Beschleunigung und Winkel des Systems im Raum. Bei der indirekten Georeferenzierung erfolgt die Zuordnung vom lokalen zum globalen Koordinatensystem durch Referenzpunkte am Boden, so genannte Passpunkte (GCPs).

Je nachdem, ob Einzelbilder oder Bildverbände georeferenziert werden sollen, werden verschiedene Verfahren zur direkten und indirekten Georeferenzierung unterschieden:

1. Direkte Georeferenzierung von Bildverbänden  
Verfahren: Aerotriangulation mittels Lage- und Positionsparameter zum Aufnahmezeitpunkt  
Sensorsysteme: chemo-optische Luftbilder
2. Indirekte Georeferenzierung von Bildverbänden  
Verfahren: Aerotriangulation, z.B. mittels Bündelblockausgleich, über GCPs  
Sensorsysteme: chemo-optische Luftbilder
3. Direkte Georeferenzierung von Einzelbildern  
Verfahren: Geometrische Korrektur der Rohdaten mittels mathematischer Beschreibung des Sensormodells und Transformation in das Zielkoordinatensystem über Lage- und Positionsparameter zum Aufnahmezeitpunkt  
Sensorsysteme: chemo-optische Luftbilder, elektro-optische Luft- und Satellitenbilder sowie SAR-Intensitätsbilder
4. Indirekte Georeferenzierung von Einzelbildern  
Verfahren: Geometrische Korrektur der Rohdaten mittels mathematischer Beschreibung des Sensormodells und Transformation in das Zielkoordinatensystem mittels polynomische Transformation über GCPs  
Sensorsysteme: chemo-optische Luftbilder, elektro-optische Luft- und Satellitenbilder sowie SAR-Intensitätsbilder

5. Direkte Georeferenzierung von Einzelpunktmessungen:

Verfahren: Transformation von Einzelpunkten der Messung mittels mathematischer Beschreibung des Sensormodells und Transformation des Zielkoordinatensystem über Lage- und Positionsparameter zum Aufnahmezeitpunkt

Sensorsysteme: LIDAR-Intensitätsbilder

Zur zusätzlichen Steigerung der Positionsgenauigkeit insbesondere für Aufnahmen in bewegtem Relief können georeferenzierte Bilder mittels eines Geländemodells noch orthorektifiziert werden. Durch die Orthorektifizierung können planimetrische Positionsfehler durch bewegtes Relief im gewissen Rahmen kompensiert werden. Da die Oberfläche eines Flughafens jedoch in der Regel nahezu eben ist, wird die Orthorektifizierung zur Reduktion von planimetrischen Positionsfehlern nicht benötigt und daher im folgenden nicht betrachtet.

### 8.5.3.1 Positionsgenauigkeit der Georeferenzierung von chemo-optischen Fernerkundungssensoren

Gängige Verfahren zur Georeferenzierung von chemo-optischen Fernerkundungsbildern, wie im Folgenden zum Verständnis der Genauigkeitsabschätzungen notwendig, wurden in Kapitel 8.2.1 vorgestellt; detaillierte Darstellungen werden in der Fachliteratur geboten (z.B. [Kra1996], [Kra1994]).

Zur Abschätzung der Positionsgenauigkeit der Georeferenzierung von chemo-optischen Fernerkundungsbildern werden im Folgenden ausschließlich Verfahren zur direkten und indirekten Georeferenzierung für Bildverbände (Aerotriangulation), wie sie in der Regel für Luftbilder angewendet werden, betrachtet. Die Georeferenzierung von Einzelbildern wird nur selten angewandt und daher hier nicht berücksichtigt.

Die Aerotriangulation besteht aus zwei Schritten:

1. Durch die innere Orientierung wird der räumliche Bezug des Originalbildes zum Bildkoordinatensystem des Sensor hergestellt.
2. Durch die äußere Orientierung wird das Bildkoordinatensystem des Sensors mit einem übergeordneten Landeskoordinatensystem in Bezug gebracht.

#### Innere Orientierung

Wie bereits in Kapitel 8.2.1.1 erläutert, beschreiben in einem idealen geometrischen Modell die Parameter der Brennweite (Kammerkonstante) und die Bildkoordinaten des Hauptpunktes die innere Orientierung eines Bildes. In der Realität müssen jedoch noch einige andere Parameter berücksichtigt werden. Durch die Fehler der Optik, der Kamera und der Photographie unterscheidet sich das physikalische Projektionszentrum vom idealen Projektionszentrum. Dadurch

- ist nicht die optische Achse Bezugsachse, sondern ein kalibrierter Hauptstrahl.
- ist der bildseitige und gegenstandsseitige Winkel des Hauptstrahls nicht identisch, weil sie nicht in der optischen Hauptebene definiert sind, sondern in der Eintrittspupille.
- ist die reale, durch den Bildanlegerahmen vorgegebene Bildweite nicht identisch mit der optischen Bildweite.
- steht die Bildebene nicht senkrecht auf der optischen Achse.

Weitere Restfehler sind der radialen optischen Verzeichnung zuzuschreiben.

Zur physischen Definition des Bildkoordinatensystems und des zugeordneten Projektionszentrums werden auf dem Luftbild Rahmenmarken (Fiducial Marks) abgebildet. Der Schnittpunkt der Rahmenmarken wird als Bildhauptpunkt (Principal Point) bezeichnet.

Photogrammetrische Messkameras sollten ein mal pro Jahr kalibriert werden. Die Angaben des Kalibrierscheins bieten die Möglichkeit, die oben genannten Fehler zu eliminieren. Er enthält Angaben zur

- genauen Brennweite,
- radialen optischen Verzeichnung,
- Position der Rahmenmarken und des Hauptpunktes,
- dem photographischen Auflösungsvermögen der Messkammer (für einen Standardfilm).

Die innere Orientierung wird durch Transformation der gemessenen Ist-Koordinaten der Rahmenmarken auf deren kalibrierte Sollkoordinaten hergestellt. Hierdurch werden die regelmäßigen Anteile der Bilddeformation aufgehoben. Zusätzlich kann der mittlere radiale Anteil der optischen Verzeichnung berücksichtigt werden. Man erhält dadurch bereinigte Bildkoordinaten [Kra1994].

### **Äußere Orientierung**

Wie bereits in Kapitel 8.2.1.1 erläutert, soll durch das Herstellen der äußeren Orientierung über Kollinearitätsgleichungen die Beziehung zwischen (bereinigten) Bildkoordinaten und der Lage des Bildinhaltes in einem räumlichen Koordinatensystem hergestellt werden. Die sechs Parameter der äußeren Orientierung sind die Objektkoordinaten des Aufnahmeortes ( $X_0, Y_0, Z_0$ ) und die Drehwinkel des Bildes um die drei räumlichen Achsen ( $\omega, \phi, \kappa$ ). Siehe hierzu auch Abbildung 59.

Die Parameter der äußeren Orientierung können während des Bildfluges mit entsprechenden Navigationssystemen (D-GPS und INS gekoppelt) zur direkten Georeferenzierung mittlerweile mit ausreichender Genauigkeit ermittelt werden [Cra2003]; zum Erreichen höchster Positionsgenauigkeiten der Georeferenzierung bieten sich jedoch nach wie vor die indirekte Georeferenzierung durch die Aerotriangulation mittels GCPs an. Bei bekannter innerer Orientierung benötigt man für ein Einzelbild mindestens drei GCPs. In einem räumlichen Rückwärtsschritt wird unter Voraussetzung der Kollinearität des Objektpunktes, des Brennpunktes des Objektivs und des Bildpunktes mit den bekannten Bild- und Objektkoordinaten der GCPs die drei Rotationswinkel und die Objektkoordinaten des Projektionszentrums zum Aufnahmezeitpunkt rekonstruiert. Die kritischen Faktoren hierbei sind besonders die Höhe (Z) und die Rotation um die Z-Achse (Kappa-Winkel  $\kappa$ ) [VIS1994].

Wie oben angedeutet sind zum Ermitteln der Parameter der äußeren Orientierung mittels indirekter Georeferenzierung GCPs erforderlich. Von ihnen müssen Lagekoordinaten und/oder Höhe bekannt sein (Objektkoordinaten). Ihre Bildkoordinaten werden visuell ermittelt und den entsprechenden Objektkoordinaten zugeordnet. Von der Genauigkeit der Objektkoordinaten und der Bildkoordinaten hängt die Genauigkeit der äußeren Orientierung entscheidend ab. Zur äußeren Orientierung von Bildblöcken benutzt man zusätzlich Verknüpfungspunkte, von denen die Bildkoordinaten auf zwei überlappenden Bildern bekannt sind, deren Objektkoordinaten anfangs aber unbekannt sind und erst im Zuge der Aerotriangulation ermittelt werden. Durch Verknüpfungspunkte können mehrere sich überlappende Bilder in einem Streifen oder Block miteinander verbunden werden.



GCPs werden unterschieden in

- Vollpasspunkte (Lage und Höhe bekannt)
- Lagepasspunkte (nur horizontale Lage bekannt)
- Höhenpasspunkte (nur Höhe bekannt)

Als GCPs können vor dem Bildflug signalisierte Punkte und gut zu identifizierende natürliche Punkte benutzt werden. Strebt man höchste Genauigkeit an, sollten GCPs signalisiert werden. Die Breite und Farbe der signalisierten Punkte sollte in Abhängigkeit vom Kontrast der Umgebung und der Flughöhe des Bildflugs gewählt werden [Kra1996].



Quelle: Eigene Grafik

Abbildung 111: Signalisierter GCP für Luftbildbefliegung

Als natürliche GCPs werden insbesondere auf dem Flughafenumfeld oft die dort vorhandenen Markierungen gewählt, ebenso Übergänge zwischen Asphalt- und Betonflächen, die sowohl in panchromatischen als auch farbigen Luftbildern gut zu identifizieren sind:



Quelle: Eigene Grafik

Abbildung 112: Aufnahme von natürlichen Kontrollpunkten auf dem Flughafen mittels D-GPS. Einmessung eines natürlichen Kontrollpunktes (links) und Dokumentation auf dem Luftbild (rechts).

Die Verteilung und Anzahl der GCPs auf einem Bild ist abhängig von der Anzahl und Lage der Bilder, die orientiert werden sollen (Einzelbild, Zweibild, Streifen oder Blöcke). Es gilt jedoch ein Minimum von drei GCPs pro Bildverband (besser vier), die nicht linear angeordnet sein sollen. Mehr GCPs als minimal erforderlich erhöhen die Genauigkeit. In der Regel misst man Nester von zwei GCPs, um Fehlmessungen identifizieren zu können. Sie sollten in den Ecken der Bilder liegen, um ein Abkippen des Blockes zu vermeiden.

Im allgemeinen sollte bei Streifen- und Blockverbänden ein GCP für jedes dritte Bild vorliegen [Vis1994]. Die Bilder eines Streifenverbandes oder eines Blocks müssen durch Verknüpfungspunkte verbunden werden. Für diese Verknüpfungspunkte werden auf zwei

sich überdeckenden Bildern die Bildkoordinaten gemessen. Sie halten den Block oder den Streifen zusammen und ermöglichen die Reduktion der Anzahl an GCPs.

Nach Kraus [Kra1994] sollten bei Blockverbänden die GCPs auf dem Blockrand liegen; er zieht aus Untersuchungen zur Positionsgenauigkeit der Blockausgleichung mit unabhängigen Modellen den Schluss, dass GCPs im Blockinneren keine nennenswerte Genauigkeitssteigerung bringen. Zur Steigerung der Positionsgenauigkeit kann der Blockrand aber dichter mit GCPs besetzt werden. Die Anzahl der Verknüpfungspunkte wirkt sich für dasselbe Modell nicht stark auf die Genauigkeit der durch die Blockausgleichung mit unabhängigen Modellen gefundenen Koordinaten der Neupunkte aus.

Die folgende Abschätzung des horizontalen Positionsfehlers  $\sigma_{\text{Georef}}$  für chemo-optische Fernerkundungsbilder basiert auf dem folgenden angenommenen Standardfall der photogrammetrischen Verarbeitung:

- indirekte Georeferenzierung durch Aerotriangulation mittels GCPs
- Georeferenzierung eines Bildverbandes durch Aerotriangulation
- digitalen photogrammetrische Verarbeitung

ür chemo-optische Sensoren setzt sich der horizontale Positionsfehler  $\sigma_{\text{Georef}}$  aus folgenden Einzelfehlern zusammen:

- Digitalisierfehler: Durch das Scannen von analogen Vorlagen resultierende Positionsungenauigkeit
- GCP- Messung: Mittlerer Fehler beim Einmessen von GCPs
- Aerotriangulation: Positionsgenauigkeit der Einmessung von Neupunkten nach Ausgleichung des Einzelmodells, Streifen oder Bildblocks durch Aerotriangulation

### Digitalisierfehler

Beim Digitalisieren analoger Vorlagen (chemo-optisches Luftbild) ergibt sich aus der vom Hersteller angegebenen Koordinatengenauigkeit  $\sigma_{\text{Koord}}$  des photogrammetrischen Scanners ein Digitalisierfehler  $\sigma_D$ . Die Koordinatengenauigkeit beträgt für Luftbildscanner in der Regel wenige  $\mu\text{m}$ .

$$\sigma_D = \sigma_{\text{Koord}} * M_B$$

$$\sigma_D = \text{Digitalisierfehler [m]}$$

$$\sigma_{\text{Koord}} = \text{Koordinatengenauigkeit nach Angaben des Herstellers des Scanners [m].}$$

$$M_B = \text{Bildmaßstab}$$

Quelle: [Kra1994]

Formel 7: Digitalisierfehler beim Scannen analoger Bilder

Unter Annahme eines Bildmaßstabes von 1:5.000 und einer Koordinatengenauigkeit des Luftbildscanners von  $2\mu\text{m}$  (z.B. Zeiss Phodis SC) ergibt sich ein Digitalisierfehler von 0.01m.

### Mittlerer Fehler der GCP-Messung

Zum Ermitteln des mittleren Fehlers bei der GCP-Messung  $\sigma_{PP}$  wird von einer differentiellen GPS-gestützten (D-GPS) GCP-Messung ausgegangen. Der Messfehler von differentialen GPS-Vermessungen ist eine Funktion von

- der Positionsgenauigkeit des Referenzpunktes
- des Messverfahrens (Codephase, Trägerphase, oder kombiniert)
- der Länge der Baseline zur Referenzstation
- der Messdauer
- der Sichtbarkeit und geometrischen Konstellation der Satelliten

Details zum Einmessung von Neupunkten mittels GPS und die hiermit zu erreichenden Positionsgenauigkeiten sind in Kapitel 9.2 dargelegt. An Flughäfen liegen in der Regel im Landeskoordinatensystem hochgenau bestimmte Referenzpunkte vor, daher wird die Baseline zwischen Referenzstation und mobiler Messeinheit (Rover) meist gering ausfallen. Unter Annahme von kombinierter Trägerphasen- und Codeauswertung kann von einem mittleren Fehler der GCP-Messung  $\sigma_{PP}$  von weniger als 0.1m ausgegangen werden (siehe Kapitel 9.2).

### Mittlerer Fehler der Aerotriangulation

Je nach räumlicher Ausprägung des Landebahnsystems werden bei der Luftbildbefliegung von Flughäfen Bildstreifen oder Blöcke aufgenommen. Kleine Flughäfen mit einer einzigen Bahn oder Parallelbahnen werden in der Regel durch einen Bildstreifen aufgenommen. Kleine Flughäfen mit gekreuzten Landebahnsystemen werden in der Regel durch gekreuzte Bildstreifen aufgenommen. Grosse Flughäfen mit parallelen und/oder gekreuzten Landebahnsystemen werden in der Regel durch Bildblöcke aufgenommen:

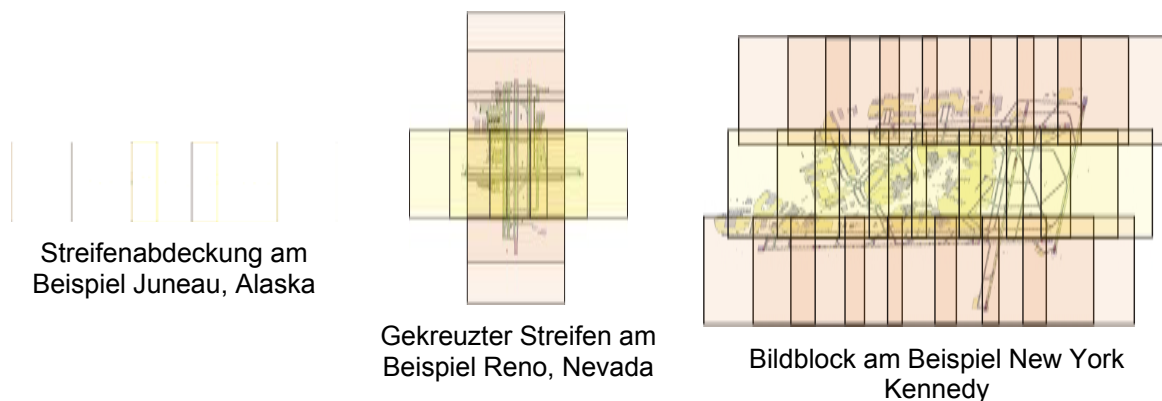


Abbildung 113: Nutzung von Bildstreifen oder Bildblöcken zur Abdeckung von Flughäfen verschiedener Grösse und mit verschiedenen angeordneten Landebahnsystemen

Zum Abschätzen der horizontalen Genauigkeit einer Aerotriangulation in Form von Ausgleichungen im Streifenmodell und Bündelblockausgleichungen muss zunächst die Genauigkeit im Einzelmodell der Zweibildauswertung (Stereomodell) abgeschätzt werden. Sie ist direkt proportional zum Bildmaßstab und abhängig von der Positionsgenauigkeit der Einmessung der Bildkoordinaten der GCPs. Der Kamertyp (Weitwinkel, Normalwinkel) spielt für die Positionsgenauigkeit keine Rolle. Als Faustformel zum Errechnen der horizontalen Positionsgenauigkeit [m] von Neupunkten im Einzelmodell mit signalisierten GCPs dient nach [Kra1994] Formel 8:

$$\sigma_{M,L} = M_B * D_B$$

- $\sigma_{M,L}$  = Horizontale Positionsgenauigkeit im Einzelmodell in m
- $M_B$  = Bildmaßstab
- $D_B$  = Definitionsungenauigkeit beim Einmessen von Bildkoordinaten der GCPs in digitalen Luftbildern ( $\frac{1}{4}$  bis  $\frac{1}{3}$  des Digitalisierintervalls [Kra1996]).

Quelle: [Kra1994]

Formel 8: Horizontale Positionsgenauigkeit von Neupunkten im Einzelmodell mit signalisierten GCPs

Im Gegensatz zur Verwendung von signalisierten GCPs muss bei Verwendung von natürlichen GCPs eine Definitionsungenauigkeit  $D_N$  berücksichtigt werden:

Natürlicher GCP	Definitionsunsicherheit $D_N$ [m]
Haus- und Zaunecken	0.07-0.12
Kanaldeckel	0.04-0.06
Feldecken	0.2-1.0
Sträucher, Bäume	0.2-1.0

Quelle: [Kra1994]

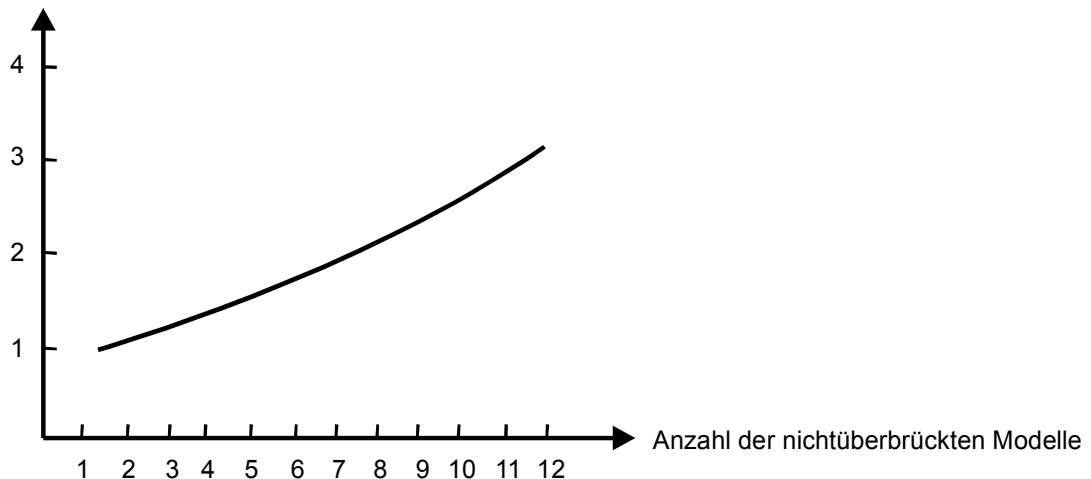
Tabelle 25: Definitionsgenauigkeit natürlicher GCPs

Zum Abschätzen der Horizontalen Positionsgenauigkeit [m] von Neupunkten im Einzelmodell  $\sigma_{M,L}$  bei Verwendung von natürlichen GCPs wird folgende Formel benutzt:

$$\sigma_{M,L} = \text{SQRT} ((M_B * D_B)^2 + D_N^2)$$

- $\sigma_{M,L}$  = Horizontale Positionsgenauigkeit im Einzelmodell in m
- $M_B$  = Bildmaßstab
- $D_B$  = Definitionsungenauigkeit beim Einmessen von Bildkoordinaten der GCPs in digitalen Luftbildern ( $\frac{1}{4}$  bis  $\frac{1}{3}$  der räumlichen Auflösung [Kra1996]).
- $D_N$  = Definitionsungenauigkeit von natürlichen GCPs

Die Horizontale Positionsgenauigkeit im Streifenmodell  $\sigma_{S,L}$ , die durch eine Streifentriangulation mit unabhängigen Modellen bestimmt wird, hängt in erster Linie von der Anzahl der ohne GCPs überbrückten Modelle ab. Um mittels der Horizontalen Positionsgenauigkeit des Einzelmodells auf die Horizontale Positionsgenauigkeit des Streifenmodells schließen zu können, wird daher ein Korrekturfaktor genutzt, welcher die Anzahl der ohne GCPs überbrückten Modelle berücksichtigt:

Korrekturfaktor  $n$  für Streifenmodell

Quelle: [Kra1994], angepasst

Abbildung 114: Genauigkeit der Streifentriangulation im Vergleich zu der des Einzelmodells

Demnach gelten folgende relative Genauigkeiten im Streifenmodell (mit signalisierten GCPs):

$$\sigma_{S,L} = (M_B * D_B) * \sigma_S / \sigma_M$$

$\sigma_{S,L}$  = Horizontale Positionsgenauigkeit im Streifenmodell in m

$M_B$  = Bildmaßstab

$D_B$  = Definitionsungenauigkeit beim Einmessen von Bildkoordinaten der GCPs in digitalen Luftbildern ( $\frac{1}{4}$  bis  $\frac{1}{3}$  der räumlichen Auflösung [Kra1996]).

$\sigma_S / \sigma_M$  = Korrekturfaktor für Streifenmodell (siehe Abbildung 114)

Formel 9: Horizontale Positionsgenauigkeit von Neupunkten im Streifenmodell (mit signalisierten GCPs)

Bei Nutzung natürlicher GCPs gelten folgende relative Genauigkeiten im Streifenmodell:

$$\sigma_{S,L} = \text{SQRT}((M_B * D_B)^2 + D_N^2) * \sigma_S / \sigma_M$$

$\sigma_{S,L}$  = Horizontale Positionsgenauigkeit im Streifenmodell in m

$M_B$  = Bildmaßstab

$D_B$  = Definitionsungenauigkeit beim Einmessen von Bildkoordinaten der GCPs in digitalen Luftbildern ( $\frac{1}{4}$  bis  $\frac{1}{3}$  der räumlichen Auflösung [Kra1996]).

$D_N$  = Definitionsungenauigkeit von natürlichen GCPs

$\sigma_S / \sigma_M$  = Korrekturfaktor für Streifenmodell (siehe Abbildung 114)

Formel 10: Horizontale Positionsgenauigkeit von Neupunkten im Streifenmodell (mit natürlichen GCPs)

Im gekreuzten Streifenmodell gelten dieselben Positionsgenauigkeiten wie im Streifenmodell; von wesentlicher Bedeutung ist hierbei die Verknüpfung der beiden Streifen an dem Kreuzungspunkt durch Tiepoints und/oder GCPs.

Zur Bestimmung der horizontalen Positionsgenauigkeit im Blockverband wird der Lagefehler des Einzelmodells mit einem Faktor, der den Gewichtseinheitsfehler der Ausgleichung ausdrückt, multipliziert:

$$\sigma_{B,L} = \sigma_{\text{Mittel}} * \sigma_{M,L}$$

$\sigma_{B,L}$  = Horizontale Positionsgenauigkeit im Blockmodell [m]  
 $\sigma_{B,L}$  = Mittlere horizontale Positionsgenauigkeit im Block [m]  
 $\sigma_{\text{Mittel}}$  = Mittlerer Gewichtseinheitsfehler

Quelle: [Kra1994]

Formel 11: Horizontale Positionsgenauigkeit von Neupunkten im Luftbildblock

Der Gewichtseinheitsfehler ist abhängig von der Blockgröße. Er wird für eine Standardbesetzung von vier GCPs auf den Blockecken für verschiedene Blockgrößen aufgeführt: Man unterscheidet den maximalen Gewichtseinheitsfehler  $\sigma_{\text{MAX}}$  und den mittleren Gewichtseinheitsfehler  $\sigma_{\text{Mittel}}$ .

Blockgröße	Anzahl GCPs	$\sigma_{\text{MAX}}$	$\sigma_{\text{Mittel}}$
<b>1 x 2</b>	4	1.02	1.02
<b>2 x 4</b>	4	1.44	1.34
<b>4 x 8</b>	4	2.28	1.85
<b>6 x 12</b>	4	3.16	2.42
<b>8 x 16</b>	4	4.08	3.02

Quelle: [Kra1994]

Tabelle 26: Mittlerer und maximaler Gewichtseinheitsfehler für Berechnung der Positionsgenauigkeit im Bildblock; wenige GCPs

Bei einer dichteren Besetzung des Blockrandes mit GCPs (an jeder Schnittstelle zweier Photos ein GCP) steigt die Genauigkeit:

Blockgröße	Anzahl GCPs	$\sigma_{\text{MAX}}$	$\sigma_{\text{Mittel}}$
<b>2 x 4</b>	8	1.01	0.94
<b>4 x 8</b>	16	1.02	0.94
<b>6 x 12</b>	24	1.10	1.00
<b>8 x 16</b>	32	1.15	1.03

Quelle: [Kra1994]

Tabelle 27: Mittlerer und maximaler Gewichtseinheitsfehler für Genauigkeitsberechnung im Block; viele GCPs

Aus Formel 8 und Formel 11 ergibt sich für die mittlere horizontale Positionsgenauigkeit  $\sigma_{B,L}$  eines Punktes im Block für signalisierte GCPs:

$$\sigma_{B,L} = (M_B * D_B) * \sigma_{\text{Mittel}}$$

$\sigma_{B,L}$  = Mittlere horizontale Positionsgenauigkeit eines Punktes im Bildblock [m]  
 $M_B$  = Bildmaßstab

$D_B$  = Definitionungenauigkeit beim Einmessen von Bildkoordinaten der GCPs in digitalen Luftbildern ( $\frac{1}{4}$  bis  $\frac{1}{3}$  der räumlichen Auflösung [Kra1996].

$\sigma_{\text{Mittel}}$  = Mittlerer Gewichtseinheitenfehler

Formel 12: Mittlere Horizontale Positionsgenauigkeit eines Punktes im Bildblock (signalisierte GCPs)

Bei Nutzung natürlicher GCPs gelten folgende relative Genauigkeiten im Bildblock:

$$\sigma_{B,L} = \text{SQRT} ((M_B * D_B)^2 + D_N^2) * \sigma_{\text{Mittel}}$$

$\sigma_{B,L}$  = Mittlere horizontale Positionsgenauigkeit eines Punktes im Bildblock [m]

$M_B$  = Bildmaßstab

$D_B$  = Definitionungenauigkeit beim Einmessen von Bildkoordinaten der GCPs in digitalen Luftbildern ( $\frac{1}{4}$  bis  $\frac{1}{3}$  der räumlichen Auflösung [Kra1996].

$D_N$  = Definitionungenauigkeit von natürlichen GCPs

$\sigma_{\text{Mittel}}$  = Mittlerer Gewichtseinheitenfehler

Formel 13: Mittlere Horizontale Positionsgenauigkeit eines Punktes im Bildblock (natürliche GCPs)

Unter Annahme folgender Standardparameter eines Bildfluges zur Aufnahme von Luftbildern zur Erstellung von Flughafendatenbanken können die in Tabelle 28 aufgeführten horizontalen Genauigkeiten bei der Aerotriangulation erreicht werden:

Bildmaßstab: 1:5.000

Räumliche Auflösung  
(bei einem angenommenen Digitalisierintervall von 14µm): 0.07m

Definitionungenauigkeit beim Einmessen  
von Bildkoordinaten der GCPs in digitalen Luftbildern  
( $\frac{1}{4}$  bis  $\frac{1}{3}$  der räumlichen Auflösung [Kra1996]): 0.02m

Definitionungenauigkeit von natürlichen GCPs: 0.2m

Modell	Art der GCPs	Kommentar	Horizontale Positionsgenauigkeit [m]
<b>Einzelmodell</b>	Signalisierte GCPs	-	0.07
	Natürliche GCPs	-	0.21
<b>Streifen bzw. Streifen gekreuzt</b>	Signalisierte GCPs	Überbrückte Modelle: 4 -> Korrekturfaktor der Streifentriangulation im Vergleich zu der des Einzelmodells: 1.2	0.08
	Natürliche GCPs	Überbrückte Modelle: 4 -> Korrekturfaktor der Streifentriangulation im Vergleich zu der des Einzelmodells: 1.2	0.25

Modell	Art der GCPs	Kommentar	Horizontale Positionsgenauigkeit [m]
<b>Block</b>	Signalisierte GCPs	Blockgröße: 6x12 Anzahl GCPs: 4 -> Mittlerer Gewichtseinheitenfehler: 3.02	0.21
		Blockgröße: 6x12 Anzahl GCPs: 24 -> Mittlerer Gewichtseinheitenfehler: 1.0	0.07
	Natürliche GCPs	Blockgröße: 6x12 Anzahl GCPs: 4 -> Mittlerer Gewichtseinheitenfehler: 3.02	0.63
		Blockgröße: 6x12 Anzahl GCPs: 24 -> Mittlerer Gewichtseinheitenfehler: 1.0	0.21

Tabelle 28: Erreichbare Positionsgenauigkeiten bei der Aerotriangulation unter Annahme von Standardparametern zur Aufnahme von Luftbildern zur Erstellung von Flughafendatenbanken

Der sich ergebende Positionsfehler  $\sigma_{M,L}$ ,  $\sigma_{S,L}$ ,  $\sigma_{B,L}$  ist lediglich als Abschätzung anzusehen. Die in der Praxis erreichten Fehlerwerte werden in ähnlicher Größenordnung liegen. Das Ergebnis wird durch Versuche zur Leistung verschiedener digitaler photogrammetrischer Systeme im Rahmen einer OEEPE/ISPRS-Studie 1996 bekräftigt [Hei1999].

### Horizontaler Lagefehler der Georeferenzierung

Der horizontale Lagefehler der Georeferenzierung ergibt sich aus der Summe des Digitalisierfehlers  $\sigma_D$ , des Fehlers bei der GCP-Messung  $\sigma_{PP}$  sowie des horizontalen Positionsfehler der Aerotriangulation ( $\sigma_{B,L}$ ,  $\sigma_{S,L}$ ,  $\sigma_{M,L}$ ):

$$\text{Für Bildblöcke:} \quad \sigma_{\text{Georef}} = \sigma_D + \sigma_{PP} + \sigma_{B,L}$$

$$\text{Für Streifen} \quad \sigma_{\text{Georef}} = \sigma_D + \sigma_{PP} + \sigma_{S,L}$$

$$\text{Für Einzelmodelle} \quad \sigma_{\text{Georef}} = \sigma_D + \sigma_{PP} + \sigma_{M,L}$$

Formel 14: Horizontaler Lagefehler der indirekten Georeferenzierung durch Aerotriangulation

Unter Annahme der folgenden Standardparameter eines Bildfluges zur Aufnahme von Luftbildern zur Erstellung von Flughafendatenbanken können die in Tabelle 29 aufgeführten horizontalen Genauigkeiten nach der Georeferenzierung erreicht werden:

Bildmaßstab: 1:5.000

Räumliche Auflösung 0.07m

(bei einem angenommenen Digitalisierintervall von 14 $\mu$ m):

Definitionsungenauigkeit beim Einmessen von Bildkoordinaten der GCPs in digitalen Luftbildern 0.02m

( $\frac{1}{4}$  bis  $\frac{1}{3}$  der räumlichen Auflösung [Kra1996]):



Definitionsungenauigkeit von natürlichen GCPs:	0.2m
Koordinatengenauigkeit des Luftbildscanners:	2 $\mu$ m
Fehler der GCP-Messung:	0.1m

Aerotriangulation				Digitalisier- fehler [m]	Fehler der Pass- punkt- messung [m]	Gesamtfehler der Georeferen- zierung $\sigma_{\text{Georef}}$ [m]
Modell	Art der GCPs	Kommentar	Horizon- taler Positions- fehler [m]			
<b>Einzel- modell</b>	Signalisierte GCPs	-	0.07	0.01	0.1	<b>0.18</b>
	Natürliche GCPs	-	0.21			<b>0.32</b>
<b>Streifen bzw. Streifen gekreuzt</b>	Signalisierte GCPs	Überbrückte Modelle: 4	0.08			<b>0.19</b>
	Natürliche GCPs	Überbrückte Modelle: 4	0.25			<b>0.36</b>
<b>Block</b>	Signalisierte GCPs	Blockgröße: 6x12 Anzahl GCPs: 4	0.21			<b>0.32</b>
		Blockgröße: 6x12 Anzahl GCPs: 24	0.07			<b>0.18</b>
	Natürliche GCPs	Blockgröße: 6x12 Anzahl GCPs: 4	0.63			<b>0.74</b>
		Blockgröße: 6x12 Anzahl GCPs: 24	0.21			<b>0.32</b>

Tabelle 29: Horizontaler Lagefehler der indirekten Georeferenzierung durch Aerotriangulation unter Annahme von Standardparametern zur Aufnahme von Luftbildern zur Erstellung von Flughafendatenbanken

Der sich ergebende Fehler  $\sigma_{\text{Georef}}$  ist zwar lediglich als Fehlerabschätzung aufzufassen, zeigt jedoch deutlich, dass der zu erwartende Positionsfehler nach der Georeferenzierung für mittels Aerotriangulation indirekt georeferenzierte Luftbilder deutlich unter den geforderten 4.95 m liegt. Da der Bildmaßstab und die erreichte räumliche Auflösung jedoch die Ausprägung von  $\sigma_{\text{M,L}}$ ,  $\sigma_{\text{S,L}}$ ,  $\sigma_{\text{B,L}}$  kontrolliert, gilt diese Aussage lediglich für flugzeuggestützte Aufnahmen chemo-optischer Sensoren. Für satellitengestützte Aufnahmen chemo-optischer Sensoren ist eine deutlich größerer Positionsfehler zu erwarten. Satellitengestützte chemo-optische Sensoren werden jedoch im Zuge der weltweiten Verfügbarkeit höchstauflösender elektro-optischer Fernerkundungssatelliten fast nicht mehr genutzt. Daher wird der erreichbaren Positionsgenauigkeit satellitengestützter chemo-optischer Sensoren im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter untersucht.

Nach [Cra2003] liegt die erreichbare Positionsgenauigkeit der direkten Georeferenzierung im Bereich derer von indirekt durch Aerotriangulation georeferenzierten chemo-optischen Luftbildern. Damit liegt die zu erwartende Positionsgenauigkeit ebenfalls deutlich unter den geforderten 4,1m.

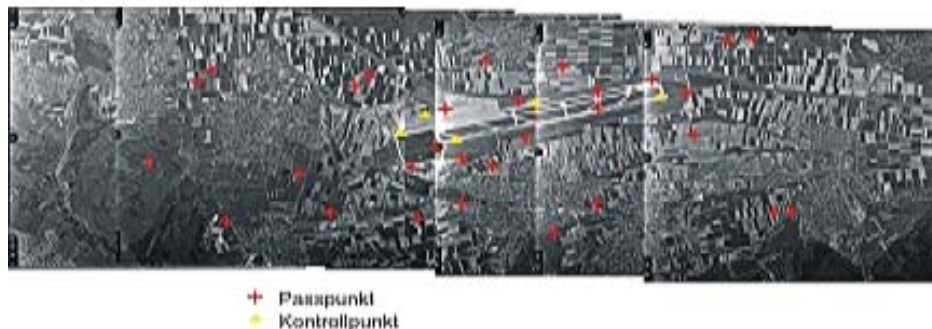
#### **8.5.3.1.1 Falluntersuchung**

Um die in der Praxis erreichte Positionsgenauigkeit der Georeferenzierung mittels Aerotriangulation von chemo-optischen Luftbildern zu überprüfen, werden im folgenden die Ergebnisse mehrerer vom Autor durchgeführter digitaler Photogrammetrieprojekte zum Erstellen von Flughafendatenbanken überprüft. Zum Evaluieren der Positionsgenauigkeit der Georeferenzierung werden im Rahmen von Photogrammetrieprojekten in der Regel zusätzlich zu GCPs eine gewisse Anzahl von Kontrollpunkten mittels bodengestützter Vermessungsmethoden eingemessen (z.B. durch D-GPS). Bei ausreichender Anzahl und richtiger Verteilung der Kontrollpunkte spiegelt die Differenz zwischen den bodengestützt eingemessenen Referenzkoordinaten der Kontrollpunkte und ihrer Koordinaten im georeferenzierten Luftbild zuverlässig die erreichte Positionsgenauigkeit wider.

Zur Evaluierung der in der Praxis erreichten Positionsgenauigkeit werden im folgenden die Ergebnisse der Photogrammetrieprojekte zum Erstellen von Flughafendatenbanken von EDDS, EHAM und EDMA untersucht.

Projektbeschreibung Flughafen Stuttgart (EDDS)

Datum:	03/1999
Befliegungsdatum:	15.05.1998
Bildmassstab:	1:17882
Modellaufbau:	Streifen, 7 Bilder, Längsüberlappung ca. 60%
Anzahl überbrückte Modelle:	0
Digitalisierintervall:	14 $\mu\text{m}$
Scanner:	Zeiss Phodis SC
Digitalisierfehler $\sigma_D$ :	2 $\mu\text{m}$
Photogrammetrie-Software:	ERDAS ORTHOMAX
GCP/Kontrollpunktmessung mittels:	Flughafenbereich: Aus Quelle Flughafen Stuttgart; alle übrigen D-GPS Codephase und Trägerphase L1
Art der GCPs:	Natürliche GCPs
Positionsgenauigkeit der GCPs $\sigma_{PP}$ :	0.1m im Flughafenbereich, 1m ausserhalb
Anzahl Kontrollpunkte:	5
Mittels Kontrollpunkte ermittelte horizontale Positionsgenauigkeit (mittlerer Fehler):	0.48m
Standardabweichung:	0.25m
Horizontale Positionsgenauigkeit CE95	0.98m



Quelle: Eigene Grafik

Abbildung 115: Verteilung der GCPs und Kontrollpunkte Photogrammetrieprojekt Flughafen Stuttgart

Projektbeschreibung Flughafen Hamburg Fuhlsbüttel (EDDH)

Datum:	09/1999
Befliegungsdatum:	06.06.1996
Bildmassstab:	1:10.000
Modellaufbau:	gekreuzte Streifen, 17 und 18 Bilder, Längsüberlappung ca. 60%
Digitalisierintervall:	21 $\mu\text{m}$
Scanner:	Zeiss Phodis SC
Digitalisierfehler $\sigma_D$ :	2 $\mu\text{m}$
Photogrammetrie-Software:	ERDAS ORTHOMAX
GCP/Kontrollpunktmessung mittels:	D-GPS, Codephase, L1 und L2 Trägerphase
Art der GCPs:	Natürliche GCPs
Positionsgenauigkeit der GCPs $\sigma_{PP}$ :	0.1m
Anzahl Kontrollpunkte:	11
Mittels Kontrollpunkte ermittelte horizontale Positionsgenauigkeit (mittlerer Fehler):	0.21m
Standardabweichung:	0.15m
Horizontale Positionsgenauigkeit CE90	0.52m

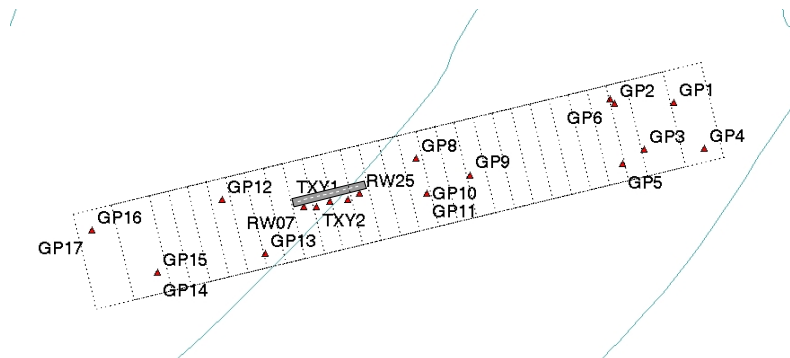


Quelle: Eigene Grafik

Abbildung 116: Verteilung der GCPs Photogrammetrieprojekt Flughafen Hamburg

### Projektbeschreibung Flughafen Augsburg (EDMA)

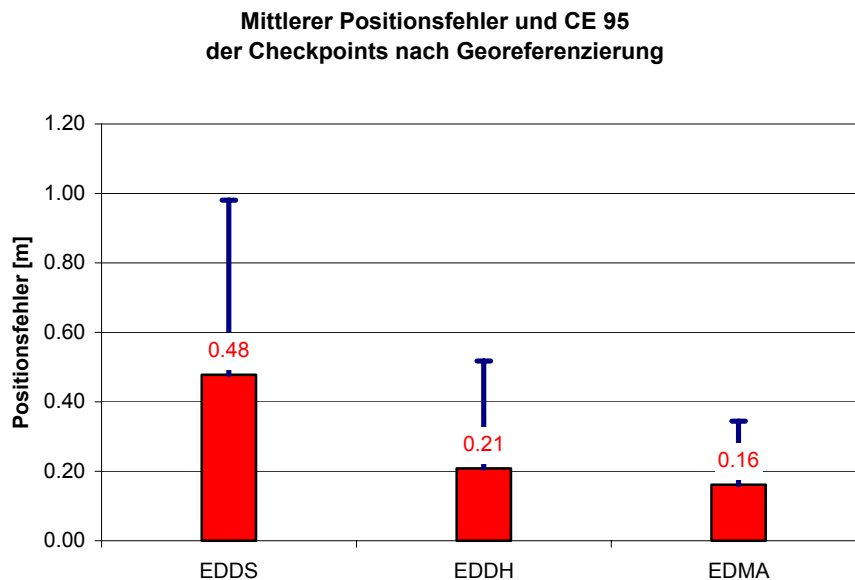
Datum:	11/1999
Befliegungsdatum:	unbekannt
Bildmassstab:	1:10.000
Modellaufbau:	Streifen, 32 Bilder, Längsüberlappung ca. 60%
Digitalisierintervall:	21 $\mu\text{m}$
Scanner:	Zeiss Phodis SC
Digitalisierfehler $\sigma_D$ :	2 $\mu\text{m}$
Photogrammetrie-Software:	LH Systems Socet Set
GCP/Kontrollpunktmessung mittels:	D-GPS, Codephase, L1 und L2 Trägerphase
Art der GCPs:	Natürliche GCPs
Positionsgenauigkeit der GCPs $\sigma_{PP}$ :	ca. 0.1m
Anzahl Kontrollpunkte:	5
Mittels Kontrollpunkte ermittelte horizontale Positionsgenauigkeit (mittlerer Fehler):	0.14m
Standardabweichung:	0.09m
Horizontale Positionsgenauigkeit CE95	0.34m



Quelle: Eigene Grafik

Abbildung 117: Verteilung der GCPs im Photogrammetrieprojekt Flughafen Augsburg

Das Ergebnis der Falluntersuchung zur Positionsgenauigkeit der Georeferenzierung von chemo-optischen Luftbildern stützt das Ergebnis der Abschätzung zur Positionsgenauigkeit. Der deutlich höhere mittlere Fehler in Stuttgart ist zum einen das Resultat der geringeren Positionsgenauigkeit der GCPs ausserhalb des Flughafenbereichs, zum anderen das Resultat der geringeren Leistung der genutzten Photogrammetrie-Software. Die für die Projekte Augsburg und Hamburg genutzte Photogrammetrie-Software LH Systems Socet Set und die hierin integrierte Aerotriangulations-Software (HATS) zeigte im Rahmen der OEEPE/ISPRS-Studie 1996 die besten Resultate [Hei1999].



Quelle: Eigene Grafik

Abbildung 118: Mittlerer Positionsfehler und CE 95 der Checkpoints in den untersuchten Photogrammetrieprojekten

Die Falluntersuchung zeigt ebenso, dass die zum Sicherstellen der Positionsgenauigkeit von Flughafendatenbankobjekten benötigte Positionsgenauigkeit der Georeferenzierung von chemo-optischen Luftbildern von 4m problemlos erreicht werden kann.

### 8.5.3.2 Positionsgenauigkeit der Georeferenzierung von elektro-optischen Fernerkundungssensoren

Elektro-optische Sensoren werden heute weitestgehend auf Satellitenplattformen eingesetzt. Die Breite des innerhalb eines Überflugs bestrichenen Areal auf der Erdoberfläche beträgt wegen der großen Aufnahmehöhe zwischen 11-185km, in umgekehrter Abhängigkeit von der räumlichen Auflösung des Sensors. Der zum Erzeugen einer Flughafendatenbank benötigte Ausschnitt kann in der Regel durch einen einzelnen Überflug (ein einzelnes Satellitenbild) abgebildet werden. Daher werden im folgenden zur Georeferenzierung von elektro-optischen Fernerkundungssensoren Verfahren zur direkten und indirekten Georeferenzierung von Einzelbildern betrachtet. Die Georeferenzierung von Bildverbänden (zweier Einzelbilder, Bildstreifen oder mehrere nebeneinander liegender Bildstreifen) durch Aerotriangulation (Bündelblockausgleich), wie sie für flugzeuggestützte elektro-optische Sensoren wegen der geringeren Flughöhe und der dadurch geringeren Streifenbreite zur Abdeckung eines Flughafens notwendig werden, wurde im vorhergehenden Kapitel bereits betrachtet.

Im Gegensatz zu chemo-optischen Luftbildsensoren besitzt das Rohprodukt elektro-optischer Fernerkundungssensoren bei den umfangreich genutzten Pushbroom-Scannern innerhalb einer Sensorzeile eine perspektivische Geometrie; in Fortbewegungsrichtung besitzen sie nahezu Parallelprojektion. Zur Georeferenzierung des Rohdatenproduktes wird letzteres zunächst sensorkorrigiert, dann geometrisch korrigiert und letztendlich georeferenziert.

Im Rahmen der Sensorkorrektur werden u.a. folgende Fehler korrigiert:

- Korrektur der internen Detektor-Geometrie (z.B. Kombination der verschiedenen CCD-Aufnahmereihen in eine virtuelle Reihe)
- Korrektur von optischen Verzerrungen, welche durch die Sensoroptik induziert wurden
- Korrektur von Scanverzerrungen (korrigiert Verzerrungen durch Drehungen und Scanrate)
- Korrektur von Linienvariationen (korrigiert Variationen der panchromatischen Scanrate)

Im Rahmen der darauf folgenden geometrischen Korrektur werden folgende Fehler behoben:

- Verzerrungen, induziert durch die relativen Bewegung eines Satelliten zur Erde
- Verzerrungen, induziert durch die Erdkrümmung
- Panoramische Verzerrungen, induziert durch Schwenkungen des Sensors

Im Rahmen der geometrischen Korrektur wird die Aufnahmegeometrie zunächst mittels einer mathematischen Beschreibung des Sensormodells rekonstruiert. Da die Sensormodelle von elektro-optischen Fernerkundungssensoren in der Regel proprietär sind, werden z.B. für die höchstauflösenden Fernerkundungssatelliten IKONOS 2 und Quickbird 2 die mathematische Beschreibung des Sensormodells in Form von rationalen Funktionen angeboten, die das Sensormodell über Polynome annähern. Die eigentliche Georeferenzierung kann im Folgeschritt direkt über die Positions- und Lageparameter des Sensors zum Aufnahmezeitpunkt oder indirekt über GCPs erfolgen. Die mit beiden Verfahren zu erreichende Positionsgenauigkeit besitzt eine deutliche Abhängigkeit von der räumlichen Auflösung des Sensors [Jac2002].

Zur direkten Georeferenzierung müssen die Bildkoordinaten in das Zielkoordinatensystem über Lage- und Positionsparameter zum Aufnahmezeitpunkt transformiert werden. Hierzu

müssen bei Pushbroom-Sensoren für jede Bildzeile die Lage- und Positionsparameter zum Aufnahmezeitpunkt bekannt sein. Diese werden aus inertialen Beschleunigungssensoren (INS), GPS und für satellitengestützte Sensoren zusätzlich mittels Startrackern berechnet.

Zur indirekten Georeferenzierung wird der Zusammenhang zwischen Bildkoordinaten und Referenzsystem durch identische Punkte, so genannte GCPs hergestellt. Hierbei wird der Zusammenhang zwischen Bildkoordinaten und Referenzsystem durch identische Punkte, so genannte GCPs hergestellt. Zur Georeferenzierung können lineare oder nicht-lineare Transformation höheren Grades genutzt werden. Von dem Grad des Transformationspolynoms hängt die Anzahl der benötigten GCPs ab.

Eine polynomische Transformation ersten Grades wird auch als lineare Transformation bezeichnet. Mittels ihrer können

- die Position in x- und y-Richtung geändert werden (Verschiebung).
- der Maßstab in x- und y-Richtung geändert werden (Dehnen, Stauchen).
- die Karte rotiert werden.

Zum Bestimmen einer linearen Transformationsformel müssen zumindest drei GCPs vorliegen. Mittels einer Transformation ersten Grades können keine ungleichförmige Maßstabsänderungen korrigiert werden. Hierzu müssen nicht-lineare Transformationen zweiten oder höheren Grades genutzt werden.

Die polynomische Transformationsgleichung eines höheren Grades  $t$  besitzen die folgende Form, wobei  $t$  der Grad des Polynoms und  $a_k$  und  $b_k$  Koeffizienten sind.

$$x_0 = \left( \sum_{i=0}^t \left( \sum_{j=0}^i a_k * x^{i-j} * y^j \right) \right)$$

$k$  wird bestimmt durch 
$$k = \frac{i * i + j}{2} + j$$

Formel 15: Polynomische Transformationsgleichung höheren Grades  $t$

Die zur Durchführung einer polynomischen Transformation eines höheren Grades  $t$  minimal benötigte Anzahl an GCPs beträgt:

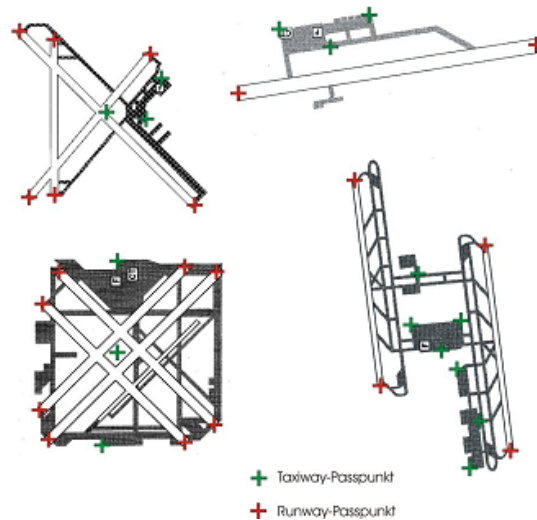
$$\frac{(t+1)*(t+2)}{2}$$

Formel 16: Zur polynomischen Transformation eines höheren Grades  $t$  benötigte Anzahl von GCPs

D.h. für ein Transformation mittels eines Polynoms zweiten Grades werden sechs GCPs benötigt. Werden mehr als die minimal benötigte Anzahl an GCPs benutzt, ist die Gleichung überbestimmt und die hierdurch auftretende Redundanz kann zur Identifizierung von fehlerhaften GCPs genutzt werden.

Die durch die indirekte Georeferenzierung erreichbare Positionsgenauigkeit hängt wesentlich von der Positionsgenauigkeit der Vermessung der GCPs, der Genauigkeit der Identifizierung der GCPs in der Fernerkundungsszene (und damit von der räumlich Auflösung des Fernerkundungsbildes) sowie der Verteilung der GCPs auf der Fernerkundungsszene ab. Die Verteilung der GCPs sollte alle zu extrahierenden Objekte umfassen. Abbildung 119 zeigt verschiedene Verteilungen von GCPs bei verschiedenen Layouts von Flughäfen.





Quelle: Eigene Grafik

Abbildung 119: Ideale Verteilung von GCPs bei verschiedenen Flughafen-Layouts

Insbesondere für höchstauflösende elektro-optische Fernerkundungssensoren, wie z.B. IKONOS II und Quickbird-2 existieren im Rahmen von spezieller für den Fernerkundungsbereich entwickelter Bildverarbeitungssoftware (z.B. ERDAS Imaging, PCI Geomatics, RSI ENVI, SocetSet, ER Mapper) sensorspezifische Transformationen, welche den Schritt der Rekonstruktion des Sensormodells (Sensorkorrektur, geometrische Korrektur) mit der Georeferenzierung verbinden.

Zusätzlich zur Georeferenzierung kann eine elektro-optische Fernerkundungsszene durch Projektion auf ein Geländemodell orthorektifiziert werden, um Positionsfehler durch Reliefverschiebungen zu korrigieren.

Im folgenden Kapitel wird zunächst die Positionsgenauigkeit der kommerziell erhältlichen elektro-optischen Fernerkundungsbilder im Rahmen eines Abgleichs der Produktspezifizierung mit den in Kapitel 8.5.2 abgeleiteten Anforderung an die Positionsgenauigkeit der Georeferenzierung verglichen. Im Rahmen der Produktspezifikation wird sich in der Regel auf durch direkte oder indirekte Georeferenzierung korrigierte Szenen bezogen.

Um die zu erreichende Positionsgenauigkeit unabhängig von den Herstellerangaben beurteilen zu können, werden im darauf folgenden Kapitel 8.5.3.2.2 die Ergebnisse publizierter wissenschaftlicher Untersuchungen insbesondere bzgl. der indirekten Georeferenzierung unter Nutzung wissenschaftlicher und kommerzieller Bildverarbeitungsprogramme untersucht und mit der Anforderung an die Positionsgenauigkeit der Georeferenzierung verglichen.

Eigene Untersuchungen zur erreichbaren Positionsgenauigkeit durch indirekte Georeferenzierung fließen im Rahmen der Falluntersuchung in Kapitel 8.5.3.2.3 ein.

Abschließend werden die Ergebnisse der Untersuchung der Produkthanforderungen, der publizierten wissenschaftlichen Untersuchungen sowie der Falluntersuchungen zusammengefasst und bewertet.

### 8.5.3.2.1 Abgleich der Anforderungen mit Produktspezifikationen

Der folgende Abgleich der Anforderungen an die Positionsgenauigkeit von elektro-optischen Fernerkundungsdaten mit der Produktspezifikation erfolgt basierend auf der von den Sensoretreibern und -verteilern bzw. den Sensordaten verteilenden Institutionen publizierten Angaben. Für die höchstauflösenden satellitengestützten Fernerkundungssensoren, wie z.B. IKONOS 2, Quickbird-2, GeoEye-1 und WordView-1 werden verschiedene Bildprodukte mit unterschiedlichen Positionsgenauigkeiten vertreiben. Diese sind im folgenden einzeln aufgeführt.

Sensor-system	Sensor-plattform	Produkt Level	Art der Georeferenzierung	Beste verfügbare räumliche Auflösung und damit verbundene radiometrische Auflösung	Relative Positions-genauigkeit RMSE [m]	Relative Positions-genauigkeit CE90 [m]	Anmerkung
DLR HRSC-A	Flugzeug	Keine Angabe	Keine Angabe	Bis zu < 0.1m	Keine Angabe	Keine Angabe	Kein kommerziell verfügbares Produkt
		Keine Angabe	Direkt	Abhängig von Flughöhe bis zu 0.05m (panchromatisch, R/G/B)	>1.0	>1.64	Georeferenzierung mittels D-GPS Codephase, <u>keine</u> GCPs, <u>keine</u> <u>Aerotriangulation</u> , bei räumlicher Auflösung von 0.4m
Leica ADS-40 [Lei2007]		Keine Angabe	Direkt	Abhängig von Flughöhe bis zu 0.05m (panchromatisch, R/G/B)	1.0	1.64	Georeferenzierung mittels D-GPS Code- und Phasenlösung, <u>keine</u> GCPs, <u>keine</u> <u>Aerotriangulation</u> , bei räumlicher Auflösung von 0.4m
		Keine Angabe	Direkt	Abhängig von Flughöhe bis zu 0.05m (panchromatisch, R/G/B)	0.5	0.82	Georeferenzierung mittels D-GPS Code- und Phasenlösung und Aerotriangulation, <u>keine</u> GCPs, bei räumlicher Auflösung von 0.4m
			Indirekt	Abhängig von Flughöhe bis zu 0.05m(panchromatisch, R/G/B)	0.2m	0.33	Georeferenzierung mittels D-GPS Code- und Phasenlösung und Aerotriangulation, GCPs, bei räumlicher Auflösung von 0.4m

## 8.5 Analyse der Positionsgenauigkeit

Sensor-system	Sensor-plattform	Produkt Level	Art der Georeferenzierung	Beste verfügbare räumliche Auflösung und damit verbundene radiometrische Auflösung	Relative Positionsgenauigkeit RMSE [m]	Relative Positionsgenauigkeit CE90 [m]	Anmerkung
GeoEye <b>GeoEye-1</b> [Sat2008]	Satellit		direkt	0.41m (panchromatisch) 0.5m (R/G/B –pansharpnd)	1.15	2.5	Entgeltige Produktspezifikation bzgl. Positionsgenauigkeit noch nicht durch GeoEye publiziert.
GeoEye <b>Ikonos 2</b> [Geo2007]	Satellit	Geo	direkt	1m (panchromatisch und R/G/B –pansharpnd)	Keine Angabe	15.0	Positionsgenauigkeit berücksichtigt keine Reliefverschiebung
		Standard Ortho	direkt	1m (panchromatisch und R/G/B –pansharpnd)	25.0	50	Korrektur der Reliefverschiebung durch Orthorektifizierung
		Reference	direkt	1m (panchromatisch und R/G/B –pansharpnd)	11.8	25.4	
		Pro	direkt	1m (panchromatisch und R/G/B –pansharpnd)	4.8	10.2	
		Precision	Indirekt	1m (panchromatisch und R/G/B –pansharpnd)	1.9	4.1	Georeferenzierung mittels GCPs von GeoEye
		Precision Plus	Indirekt	1m (panchromatisch und R/G/B –pansharpnd)	0.9	2.0	Georeferenzierung mittels GCPs von GeoEye

## 8.5 Analyse der Positionsgenauigkeit

Sensor-system	Sensor-plattform	Produkt Level	Art der Georeferenzierung	Beste verfügbare räumliche Auflösung und damit verbundene radiometrische Auflösung	Relative Positionsgenauigkeit RMSE [m]	Relative Positionsgenauigkeit CE90 [m]	Anmerkung
DigitalGlobe <b>Quickbird 2</b> [Dig2007]	Satellit	Basic Imagery User processed	Direkt	0.6m (panchromatisch)  2.4m (R/G/B)	14.0	23.0	Die erreichbare Genauigkeit bezieht sich auf die direkte Georeferenzierung basierend auf der mitgelieferten Sensorinformation und einem Geländemodell. Positionsgenauigkeit berücksichtigt keine Reliefverschiebung
		Basic Imagery User processed	Indirekt	0.6m (panchromatisch)  2.4m (R/G/B)	2.0 (Rigorous Sensor Model)  3.0 (RCP)	3.3 (Rigorous Sensor Model)  4.9 RCP	Bei Georeferenzierung durch Nutzer mittels spezieller Image-Processing Software unter Nutzung des QuickBird Rigorous Sensor Modells oder der Rational Polynomial Coefficients (RPCs), GCPs mit Submeter-Genauigkeit und Orthorektifizierung durch hochgenaue Geländemodelle (z.B DTED Level2)
		Standard Imagery	Direkt	0.6m (panchromatisch und R/G/B –pansharpend)	14.0	23.0	Georeferenziert mittels Sensorlageinformation und grobem Geländemodell
		Standard Imagery User processed	Indirekt	0.6m (panchromatisch und R/G/B –pansharpend)	3m (RCP)	4.9 (RCP)	Bei Georeferenzierung durch Nutzer mittels spezieller Image-Processing Software unter Nutzung der Rational Polynomial Coefficients (RPCs), GCPs mit Submeter-Genauigkeit und Orthorektifizierung durch hochgenaue Geländemodelle (z.B DTED Level2)

## 8.5 Analyse der Positionsgenauigkeit

Sensor-system	Sensor-plattform	Produkt Level	Art der Georeferenzierung	Beste verfügbare räumliche Auflösung und damit verbundene radiometrische Auflösung	Relative Positionsgenauigkeit RMSE [m]	Relative Positionsgenauigkeit CE90 [m]	Anmerkung
		Ortho-Ready Standard Imagery	Direkt	0.6m (panchromatisch und R/G/B –pansharp)end)	14.0	23.0	Georeferenziert mittels Sensorlageinformation; keine Orthorektifizierung
		Ortho 1:50.000	Indirekt	0.6m (panchromatisch und R/G/B –pansharp)end)	15.4	25.4	Orthorektifiziert und georeferenziert mittels Geländemodell und GCPs von DigitalGlobe
		Ortho 1:12.000	Indirekt	0.6m (panchromatisch und R/G/B –pansharp)end)	6.2	10.2	Orthorektifiziert und georeferenziert mittels Geländemodell und GCPs von DigitalGlobe; Verfügbar nur in USA und Kanada
		Ortho 1:5.000	Indirekt	0.6m (panchromatisch und R/G/B –pansharp)end)	2.6	4.2	Orthorektifiziert und georeferenziert mittels Geländemodell und GCPs von DigitalGlobe
		Ortho 1:4.800	Indirekt	0.6m (panchromatisch und R/G/B –pansharp)end)	2.5	4.1	Orthorektifiziert und georeferenziert mittels Geländemodell und GCPs von DigitalGlobe; Verfügbar nur in USA und Kanada
		Basic Imagery User processed)	Direkt	0.5m (panchromatisch)		6.5	Die erreichbare Genauigkeit bezieht sich auf die direkte Georeferenzierung basierend auf der mitgelieferten Sensorinformation und einem Geländemodell. Positionsgenauigkeit berücksichtigt keine Reliefverschiebung
DigitalGlobe <b>WorldView-1</b> [Dig2008]	Satellit						

Sensor-system	Sensor-plattform	Produkt Level	Art der Georeferenzierung	Beste verfügbare räumliche Auflösung und damit verbundene radiometrische Auflösung	Relative Positionsgenauigkeit RMSE [m]	Relative Positionsgenauigkeit CE90 [m]	Anmerkung
		Standard Imagery	Direkt	0.5m (panchromatisch)		6.5	Georeferenziert mittels Sensorlageinformation und grobem Geländemodell
		Ortho 1:12.000	Indirekt	0.5m (panchromatisch)	6.2	10.2	Orthorektifiziert und georeferenziert mittels Geländemodell und Paspunkten von DigitalGlobe; Verfügbar nur in USA und Kanada
		Ortho 1:5.000	Indirekt	0.5m (panchromatisch)	2.6	4.2	Orthorektifiziert und georeferenziert mittels Geländemodell und Paspunkten von DigitalGlobe
		Ortho 1:4.800	Indirekt	0.5m (panchromatisch)	2.5	4.1	Orthorektifiziert und georeferenziert mittels Geländemodell und GCPs von DigitalGlobe; Verfügbar nur in USA und Kanada
		Level 1B	Direkt	1.9m (panchromatisch)	Keine Angaben	Keine Angaben	Georeferenziert mittels Sensorlageinformation
ImageSat Int. <b>EROS A</b> [Ima2007]	Satellit	Level 1B	Direkt	0.7m (panchromatisch)	Keine Angaben	Keine Angaben	Georeferenziert mittels Sensorlageinformation
ImageSat Int. <b>EROS B</b> [Ima2007]	Satellit	Level 1B	Direkt	5.0m (R/G/B)	Keine Angaben	Keine Angaben	In keiner Produktbeschreibung der Vertrieberfirmen wurden Angaben zur
<b>IRS P6</b>	Satellit	Merge	Keine Angaben				

## 8.5 Analyse der Positionsgenauigkeit

Sensor-system	Sensor-plattform	Produkt Level	Art der Georeferenzierung	Beste verfügbare räumliche Auflösung und damit verbundene radiometrische Auflösung	Relative Positionsgenauigkeit RMSE [m]	Relative Positionsgenauigkeit CE90 [m]	Anmerkung
		LISS-IV Mono	Keine Angaben	5.0 (panchromatisch)	Keine Angaben	Keine Angaben	Positionsgenauigkeit gefunden
<b>SpotImage SPOT 5 [Spo2007]</b>	Satellit	SpotScene Level 1A	Direkt	2.5m (R/G/B und panchromatisch)	30.0	49.5	Positionsgenauigkeit berücksichtigt keine Reliefverschiebung
		SpotScene Level 1B	Direkt	2.5m (panchromatisch)	30.0	49.5	Positionsgenauigkeit berücksichtigt keine Reliefverschiebung
		SpotScene Level 2A	Direkt	2.5m (R/G/B und panchromatisch)	30.0	49.5	Positionsgenauigkeit berücksichtigt keine Reliefverschiebung
		SpotView Level 2B	Indirekt	2.5m (R/G/B und panchromatisch)	>10.0	>16.4	
		SpotView Level 3	Indirekt	2.5m (R/G/B und panchromatisch)	10.0	16.4	Orthorektifiziert und georeferenziert mittels Geländemodell und GCPs von Nutzer
<b>Landsat 7 [USG2007]</b>	Satellit	Level 1G	Indirekt	15m (panchromatisch)	250.0	410.0	

Tabelle 30: Abgleich der Anforderungen an Positionsgenauigkeit mit Produktspezifikationen elektro-optischer Fernerkundungssysteme

Die erforderliche Positionsgenauigkeit nach Georeferenzierung von 4.1m wird laut Produktbeschreibungen nur von wenigen Sensoren bzw. assoziierten Bildprodukten erreicht. Die Ursache hierfür liegt im wesentlichen in der geringeren räumlichen Auflösung der übrigen untersuchten satellitengestützten Sensoren.

Folgende Sensoren bzw. assoziierten Produkte erfüllen laut Produktbeschreibung die Anforderung an Positionsgenauigkeit von 4.1m nach Georeferenzierung:

### Flugzeuggestützte elektro-optische Sensoren:

- Leica ADS-40 (bei allen Varianten der direkten und indirekten Georeferenzierung).

### Satellitengestützte elektro-optische Sensoren und Produkte:

- GeoEye-1 direkt georeferenziert
- GeoEye Ikonos II *Precision* -Produkt indirekt mittels GCPs georeferenziert.
- GeoEye Ikonos II *Precision Plus* -Produkt indirekt mittels GCPs georeferenziert.
- DigitalGlobe Quickbird-2 Basic und Standard Imagery Product (bei Georeferenzierung durch Nutzer mittels spezieller Image-Processing Software unter Nutzung des QuickBird Rigorous Sensor Modells oder der Rational Polynomial Coefficients (RPCs), GCPs mit Submeter-Genauigkeit und Orthorektifizierung durch hochgenaue Geländemodelle).
- DigitalGlobe Quickbird-2 *Ortho*-Produkt 1:5.000 und 1:4.800 indirekt mittels GCPs und Geländemodell georeferenziert (Ortho 1:4.800 jedoch nur in USA und Kanada verfügbar).
- Digital Globe WorldView-1 *Ortho*-Produkt 1:5.000 und 1:4.800 indirekt mittels GCPs und Geländemodell georeferenziert (Ortho 1:4.800 jedoch nur in USA und Kanada verfügbar).

Der Unterschied zwischen den oben aufgeführten flugzeuggestützten und satellitengestützten elektro-optischen Sensoren liegt hierbei im wesentlichen in der Möglichkeit, bei flugzeuggestützten elektro-optischen Sensoren selbst mittels der kostengünstigeren direkten Georeferenzierung die erforderliche Positionsgenauigkeit von 4.1m zu erreichen. Einzige Ausnahme ist der seit Herbst 2008 im Orbit befindliche höchstauflösende satellitengestützte Sensor GeoEye-1, welcher laut Spezifikation der Herstellerfirma eine Positionsgenauigkeit von 2.5m CE90 mittels direkter Georeferenzierung liefert [Sat2008]. Für die satellitengestützten Sensoren Ikonos II, Quickbird-2 und Worldview-1 sind hingegen GCPs und Geländemodelle zur indirekten Georeferenzierung und Orthokorrektur notwendig, um die erforderliche Positionsgenauigkeit der Georeferenzierung zu erreichen.



### 8.5.3.2.2 Ergebnisse publizierter wissenschaftlicher Untersuchungen

Zur Verifizierung der in den in Kapitel 8.5.3.2.1 aufgeführten Angaben zur Positionsgenauigkeit in den Produktspezifikationen, insbesondere hinsichtlich der erreichbaren Positionsgenauigkeit der Georeferenzierung mittels höchstauflösenden satellitengestützten elektro-optischen Sensoren werden im folgenden tabellarisch verschiedene wissenschaftliche Publikationen zu diesem Thema, die Art der bei der Untersuchung genutzten geometrischen Korrektur und Georeferenzierung sowie die Ergebnisse bzgl. der Positionsgenauigkeit aufgeführt.

Sensor-system	Sensor-plattform	Produkt Level	Art der Georeferenzierung	Wissenschaftlicher Beitrag	Relative Positions-genauigkeit CE90 [m]
DLR <b>HRSC-A</b>	Flugzeug		Direkte Georeferenzierung mittels Aerotriangulation (Bündelblockausgleich), räumliche Auflösung von 0.20m panchromatisch / 0.45m multispektral	[Neu1999]	0.5
Leica <b>ADS-40</b>	Flugzeug	Keine Angabe	Indirekte Georeferenzierung mittels D-GPS Code- und Phasenlösung Aerotriangulation (Bündelblockausgleich) mittels hochgenauer GCPs, bei räumlicher Auflösung von 0.2m	[Tem2003]	0.2
GeoEye <b>Ikonos 2</b>	Satellit	Geo	Direkte Georeferenzierung, Höhenkorrektur durch Projektion auf eine Referenzebene	[Jac2002]	14.9
		Geo	Indirekte Georeferenzierung durch Affintransformation, Korrektur der Geländeverschiebung durch Orthorektifizierung	[Jac2002]	3.4
		Geo	Indirekte Georeferenzierung: Zunächst Indirekte Georeferenzierung durch Rational Polynomial Coefficients (RPC), dann Shift durch 1 GCP zur Korrektur von Offset	[Fra2001]	3.3
		Geo	Indirekte Georeferenzierung durch Affintransformation. Reduktion der Geländehöhen der GCPs auf eine Referenzebene.	[Fra2001]	0.8

Sensor-system	Sensor-plattform	Produkt Level	Art der Georeferenzierung	Wissenschaftlicher Beitrag	Relative Positions-genauigkeit CE90 [m]
		Geo	Indirekte Georeferenzierung durch 17 GCPs (Submeter-Genauigkeit) unter Nutzung von PCI Geomatics OrthoEngine Software und Orthorektifizierung mittels 20m- Geländemodell	[Gan2001]	1.2
DigitalGlobe <b>Quickbird 2</b>	Satellit	Basic Imagery	Indirekte Georeferenzierung durch Rigorous Sensor Modell mit 6 GCPs (Submeter-Genauigkeit) unter Nutzung von PCI Geomatics OrthoEngine Software	[Zha2002]	1.5
		Ortho Ready Standard Imagery	Indirekte Georeferenzierung durch Rigorous Sensor Modell mit 8 GCPs (Submeter-Genauigkeit)	[Zha2002]	2.0
		Ortho Ready Standard Imagery	Indirekte Georeferenzierung durch Rational Polynomial Coefficients (RPC) mit 6 GCPs (Submeter-Genauigkeit)	[Zha2002]	3.8
		Basic Imagery	Indirekte Georeferenzierung mittels Software SATRAC, BLASPO, COMPSO mittels 48 GCPs (Submeter-Genauigkeit)	[Eil2003]	1.0
		Basic Imagery	Indirekte Georeferenzierung mittels Software SATRAC, BLASPO, COMPSO mittels 9 GCPs (Submeter-Genauigkeit)	[Eil2003]	3.6
<b>IRS P6</b>	Satellit	LISS IV	Indirekte Georeferenzierung durch Rational Polynomial Coefficients (RPC) und Affintransformation	[Lut2005]	5.9
		LISS IV	Indirekte Georeferenzierung durch Rational Polynomial Coefficients (RPC) und polynomische Transformation 2. Grades	[Lut2005]	5.3
ImageSat Int. <b>EROS A</b>	Satellit	Level 1A	Indirekte Georeferenzierung durch Rigorous Sensor Modell von Spacemetric AB unter Nutzung von 9 GCP (Submeter-Genauigkeit)	[Wes2001]	4.0

Tabelle 31: Evaluierung der Anforderungen an Positionsgenauigkeit mittels publizierter wissenschaftlicher Ergebnisse zur Positionsgenauigkeit elektro-optischer Fernerkundungssysteme

Das Ergebnis der Evaluierung der Anforderungen an Positionsgenauigkeit mittels publizierter wissenschaftlicher Ergebnisse zur Positionsgenauigkeit elektro-optischer Fernerkundungssysteme unterstützt die Angaben der Produktspezifikation bzgl. folgender Sensoren:

- Flugzeuggestützter elektro-optischer Sensor Leica Geosystems ADS40.
- Satellitengestützter elektro-optischer Sensor Quickbird-2, Produktlevel Basic Imagery, bei indirekter Georeferenzierung durch Nutzer mittels Rigorous Sensor Modell.

Es konnte nachgewiesen werden, dass für den flugzeuggestützten elektro-optischen Sensor HRSC-A sowie für den satellitengestützten Sensor EROS A, Produktlevel 1A die benötigte Positionsgenauigkeit bei indirekter Georeferenzierung durch ein Rigorous Sensormodell und GCPs erreicht werden kann. Die Auswertung der wissenschaftlichen Publikationen bzgl. IRS P6, Produktlevel LISS IV zeigte, dass die erforderliche Positionsgenauigkeit nicht erreicht werden kann.

Zusätzlich zu den Angaben der Produktspezifikation konnte für IKONOS II im Produktlevel Geo nachgewiesen werden, dass die benötigte Positionsgenauigkeit bei indirekter Georeferenzierung durch Nutzer mittels Affintransformation und mittels Rational Polynomial Coefficients (RPC) erreicht werden konnte. Insbesondere die durch die geringe Anzahl der benötigten GCPs sehr kostenattraktive indirekte Georeferenzierung durch Affintransformation für IKONOS II bietet damit eine Alternative zu den teureren IKONOS II Precision-Plus Produkten bzw. zur Georeferenzierung über RCPs [Fra2001].

Ebenso konnte zusätzlich zu den Angaben der Produktspezifikation das Erreichen der benötigten Positionsgenauigkeit für Quickbird-2, Produktlevel Basic Imagery und Ortho Ready Standard Imagery, bei indirekter Georeferenzierung durch Nutzer

- mittels Rigorous Sensor Modell
- mittels Rational Polynomial Coefficients

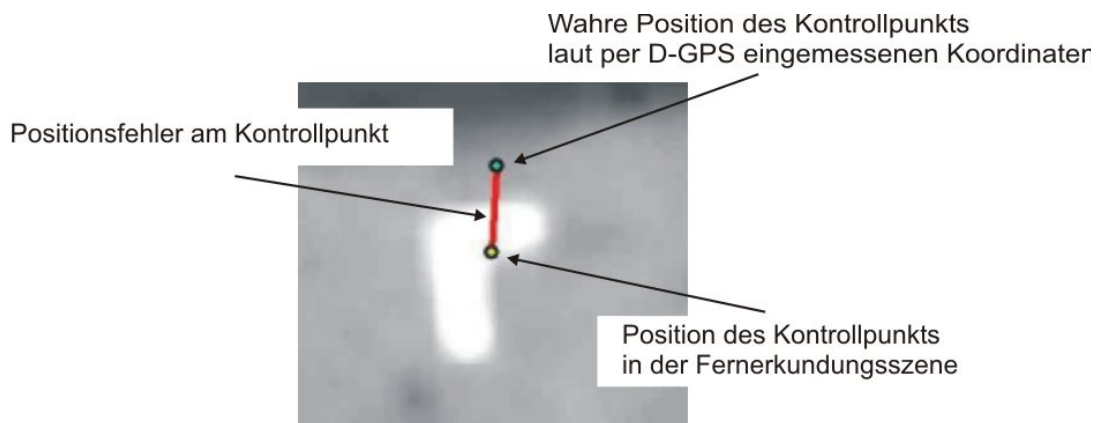
nachgewiesen werden. Um für Quickbird-2 höchste Positionsgenauigkeit zu erreichen, wird empfohlen, die indirekte Georeferenzierung mittels Rigorous Sensor Modell durchzuführen [Tou2002].

Das Ergebnis der Evaluierung der Anforderungen an Positionsgenauigkeit mittels publizierter wissenschaftlicher Ergebnisse zur Positionsgenauigkeit elektro-optischer Fernerkundungssysteme zeigt, dass Produktderivate der gegenwärtig nutzbaren Sensorsysteme HRSC-A, ADS-40, Quickbird-2 und IKONOS II die Anforderungen an Positionsgenauigkeit von 4.95m erfüllen. Für den satellitengestützten elektro-optischen Sensor Digital Globe WorldView-1 sowie GeoEye GeoEye-1 waren wegen der erst kürzlich erfolgten Inbetriebnahme noch keine wissenschaftlichen Publikationen verfügbar.

### 8.5.3.2.3 Falluntersuchung

Im folgenden wird die erreichte Positionsgenauigkeit der Georeferenzierung für verschiedene Sensoren und Korrekturverfahren untersucht. Die Verifizierung der Positionsgenauigkeit wurde im Rahmen von verschiedenen Projekten des FSR durchgeführt.

Zur Untersuchung der Positionsgenauigkeit der Fernerkundungsszenen wurden über die einzelnen Szenen verteilte eindeutig in der Szene zu identifizierende natürliche GCPs mittels Leica SR-530 D-GPS (L1- und L2 Code- und Phasenprozessierung) als Kontrollpunkte eingemessen. Die hierdurch erreichte Positionsgenauigkeit der Kontrollpunkte lag bei ca. 0.2m oder besser. Die wahre Position der Kontrollpunkte wurde mit der abgebildeten Position der Kontrollpunkte in der Fernerkundungsszene verglichen:



Quelle: Eigene Grafik

Abbildung 120: Verifizierung der Positionsgenauigkeit der Fernerkundungsszene durch per D-GPS eingemessene natürliche GCPs




Der resultierende Positionsfehler der Szene wurde als CE90 aus den einzelnen Positionsfehlern der Kontrollpunkte abgeleitet.

### Quickbird-2 Custom Orthorectified-Szenen:

Für die Flughäfen Frankfurt (EDDF), Amsterdam Schiphol (EHAM) sowie Renton Municipal (KRNT) wurde die erreichte Georeferenzierung von kommerziell erhältlichen Quickbird-2 Custom Orthorectified – Szenen untersucht.

#### Georeferenzierung:

Georeferenzierung durch Sensor- und geometrische Korrektur, indirekte Georeferenzierung unter Nutzung von natürlichen GCPs (Runway-Thresholds) und Orthorektifizierung durch Geländemodell. Abgeschätzte Identifizierungsgenauigkeit der GCPs unter Berücksichtigung der schwierigen Lokalisierung des Threshold in der Fernerkundungsszene ca. 3 Pixel = 1.8m).

Flughafen	Frankfurt (EDDF)	Amsterdam (EHAM)	Renton (KRNT)
Anzahl GCPs	6 (natürliche GCPs)	12 (natürliche GCPs)	3 (natürliche GCPs)
Anzahl Kontrollpunkte	11	20	12
Positions-fehler (RMSE):	3.9m	5.3m	5.3 m
Standard-abweichung:	1.4m	0.8m	2.3 m
Positions-fehler (CE90):	5.3m	6.0m	7.0 m
Verteilung der Kontrollpunkte			

Quellen: Eigene Abbildung

Tabelle 32: Evaluierung der Positionsgenauigkeit der Georeferenzierung von Quickbird-2 Custom Orthorectified-Szenen

Ergebnis:


Das Ergebnis zeigt, dass die erreichbare Positionsgenauigkeit der indirekten Georeferenzierung und Orthorektifizierung weitgehend abhängig ist von der Positionsgenauigkeit der GCPs und der Genauigkeit der Identifizierung der genutzten GCPs in der Fernerkundungsszene. In oben untersuchten Fällen wurden als natürliche GCPs die Runway Thresholds genutzt. Während die Threshold-Koordinaten in der Regel mit Positionsgenauigkeiten im Dezimeterbereich vorliegen, ist der Threshold wegen seiner geringen Größe der Markierung (zwischen 1cm als Nagel bis ca. 10cm als Marke) als Punkt jedoch auf chemo-optischen Luftbildern und elektro-optischen Fernerkundungsszenen nicht zu identifizieren. Seine Lage kann jedoch am Ende der Landebahn als Mittelpunkt der Längsasche interpoliert werden. Die hierdurch induzierte Ungenauigkeit führt dazu, dass bei den oben untersuchten Beispielen die Anforderung an Positionsgenauigkeit der Georeferenzierung nicht erreicht wurde, obwohl die Ortho-Produkte laut Produktspezifikation bis zu 4.95m Positionsgenauigkeit (CE90) erreichen können.

**IKONOS II Standard Imagery Geometrically Corrected-Szenen:**

Für die Flughafen Frankfurt (EDDF) wurde die erreichte Georeferenzierung von IKONOS II Standard Imagery Geometrically Corrected – Szenen bei indirekter Georeferenzierung durch den Nutzer untersucht.

Georeferenzierung:

Das geometrisch korrigierte Standardprodukt wurde mittels ERDAS Imaging durch eine polynomische Transformation 2. Ordnung unter Nutzung von 6 natürlichen GCPs (Runway-Thresholds) indirekt georeferenziert. Abgeschätzte Identifizierungsgenauigkeit der GCPs unter Berücksichtigung der schwierigen Lokalisierung des Threshold in der Fernerkundungsszene ca. 3 Pixel = 1.8m)

Flughafen	Frankfurt (EDDF)
Anzahl GCPs	6 (natürliche GCPs)
Anzahl Kontrollpunkte	11
Positionsfehler der Szene (RMSE):	8.7m
Standardabweichung:	1.7m
Positionsfehler der Szene (CE90):	11.2m
Verteilung der Kontrollpunkte	

Quellen: Eigene Abbildung

Tabelle 33: Evaluierung der Positionsgenauigkeit der Georeferenzierung von IKONOS II Standard Imagery Geometrically Corrected Szenen

Ergebnis:

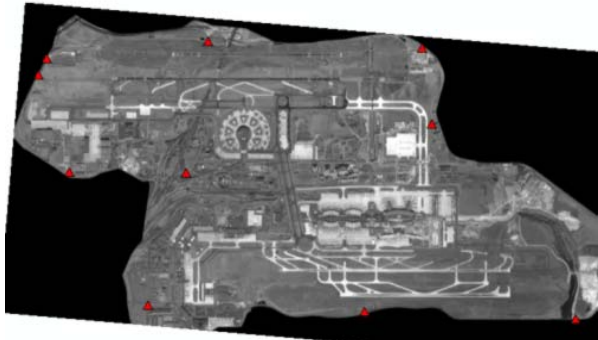
Das Ergebnis macht den Unterschied zwischen der erreichbaren Positionsgenauigkeit durch indirekte Georeferenzierung mittels polynomischer Transformation 2. Grades unter Nutzung von GCPs und einer komplexeren indirekten Georeferenzierung, wie sie zuvor für die Quickbird-2-Szenen genutzt wurde, deutlich. Die nach der komplexeren Methode indirekt georeferenzierte Quickbird-2 –Szene besitzt eine um 5.8m bessere Positionsgenauigkeit (bzgl. CE90). Die verbesserte Positionsgenauigkeit wird nicht auf den unterschiedlichen Sensor zurückgeführt.

**HRSC-A:**

Für den Flughafen Paris CDG (LFPG) wurde die erreichte Georeferenzierung von kommerziell verfügbaren HRSC-A – Szenen untersucht.

Georeferenzierung:

Indirekte Georeferenzierung durch Aerotriangulation und Bündelblockausgleich unter Nutzung von GCPs (Submeter-Positionsgenauigkeit)

Flughafen	Paris Charles-de-Gaulles (LFPG)
Anzahl GCPs	unbekannt
Anzahl Kontrollpunkte	9
Positionsfehler der Szene (RMSE):	0.3 m
Standardabweichung:	0.2 m
Positionsfehler der Szene (CE90):	0.5 m
Verteilung der Kontrollpunkte	

Quelle: Eigene Grafik

Tabelle 34: Evaluierung der Positionsgenauigkeit der Georeferenzierung von kommerziell verfügbaren HRSC-A - Szenen

#### Ergebnis:

Das Ergebnis belegt das hohe Potential flugzeuggestützter elektro-optischer Sensoren bzgl. Positionsgenauigkeit und insbesondere die hohe Positionsgenauigkeit der HRSC-A Szenen. Die erforderliche Positionsgenauigkeit kann wie bereits vorher belegt durch den HRSC-A Sensor geliefert werden.

#### **8.5.3.2.4 Zusammenfassung der Ergebnisse**

Das Erfüllen der erforderlichen Positionsgenauigkeit elektro-optischer Fernerkundungssensoren ist primär eine Funktion der räumlichen Auflösung, und damit eine Funktion der Flughöhe und der Sensorplattform. Die Positionsgenauigkeit der Georeferenzierung wird ebenfalls beeinflusst durch

- die Positionsgenauigkeit der Einmessung der GCPs.
- die Genauigkeit der Identifizierung der GCPs in der Fernerkundungsszene (Funktion der räumliche Auflösung).
- Die Art der Georeferenzierung (direkt/indirekt, Art des Sensormodells)

Alle untersuchten flugzeuggestützten elektro-optischen Sensoren erfüllen die Anforderung an Positionsgenauigkeit insbesondere wegen der durch die geringere Flughöhe höheren räumliche Auflösung des Sensors. Selbst bei der im Vergleich zur indirekten Georeferenzierung durch Wegfallen der GCPs sehr kostengünstigen direkten Georeferenzierung kann bei dem Leica ADS-40 Sensor die Anforderung an Positionsgenauigkeit noch erfüllt werden.



Bzgl. der satellitengestützten elektro-optischen Sensoren erfüllen nur die Sensoren mit höchster räumlicher Auflösung (< 2m) bei indirekter Georeferenzierung durch spezifische Modelle und GCPs mit Submetergenauigkeit die Anforderungen an Positionsgenauigkeit.

Abgeleitet aus der Analyse der Produktspezifikationen, der wissenschaftlichen Publikationen und der Falluntersuchungen erfüllen folgende Sensoren die Anforderungen an die Positionsgenauigkeit:

Sensor-system	Sensor-plattform	Beste räumliche Auflösung	Produkt Level	Art der Georeferen- zierung	Relative Positions- genauigkeit
		[m]			CE90 [m]
DLR <b>HRSC-A</b>	Flugzeug	Bis zu < 0.1	Keine Angabe	Direkt	Bis zu 0.5
Leica <b>ADS-40</b>		Bis zu 0.05	Keine Angabe	Direkt, Nutzerprozessiert	Bis zu 0.82
			Keine Angabe	Indirekt, Nutzerprozessiert	Bis zu 0.2
GeoEye <b>GeoEye-1</b>	Satellit	0.41	Keine Angabe	Direkt	2.5
GeoEye <b>Ikonos 2</b>		1.0m	Geo	Indirekt, Nutzerprozessiert	Bis zu 0.8
			Precision	Indirekt	4.1
			Precision Plus	Indirekt	2.0
DigitalGlobe <b>Quickbird 2</b>		0.6	Standard Imagery	Indirekt, Nutzerprozessiert	4.9
			Basic Imagery	Indirekt, Nutzerprozessiert	Bis zu 1.0
			Ortho 1:5.000	Indirekt	4.2
			Ortho 1:4.800	Indirekt	4.1
DigitalGlobe <b>Worldview 1</b>		0.5	Ortho 1:5.000	Indirekt	4.2
		0.5	Ortho 1:4.800	Indirekt	4.1
ImageSat Int. <b>EROS A</b>		1.9	Level 1B	Indirekt, Nutzerprozessiert	Bis zu 4.0

Tabelle 35: Übersicht der die Anforderungen an Positionsgenauigkeit erfüllenden elektro-optischen Fernerkundungssensoren



### 8.5.3.3 Positionsgenauigkeit der Georeferenzierung von SAR

Mittels SAR-Sensoren können verschiedene Produkte erstellt werden:

- Radar-Intensitätsbilder, welche die Intensität der Reflektion des ausgesandten Signals durch die am Erdboden befindlichen Objekte darstellen.
- Phaseninterferogramme, welche den über die Laufzeit ermittelten Abstand zur Erdoberfläche enthalten.
- Aus Radarintensitätsbildern bzw. aus Phaseninterferogrammen abgeleitete Geländemodelle.

Phaseninterferogramme sowie Geländemodelle besitzen jedoch keine ausreichende Information zur Objektunterscheidung und bilden daher keine Basis zur Objektextraktion von Flughafendatabankobjekten. Im Folgenden wird daher lediglich die zu erreichende Positionsgenauigkeit von georeferenzierten Radarintensitätsbilder evaluiert.

Die Geometrie von Radarintensitätsbildern hat Ähnlichkeit mit der von elektro-optischen Zeilenscannern. Die Bilddaten werden fortlaufend senkrecht zur Flugrichtung aufgezeichnet. In Flugrichtung entspricht dies einer Parallelprojektion. In Zeilenrichtung ergeben sich Lage und geometrische Verzerrung der Flächenelemente aus der Laufzeit der Wellenfronten, ihrem Echo und den abgeleiteten Schrägentfernungen der Objekte in Bezug auf die Radarantenne. Für eine ebene Fläche werden die Reflexionssignale entsprechend ihrer Laufzeit (bzw. Schrägentfernung) in Bilddaten umgesetzt, mit der Folge einer laufzeitbedingten geometrischen Lageverzerrung. Eine nahe gelegene Geländestrecke wird von der Wellenfront schneller durchlaufen als eine ferne. Also wird sie im Schrägentfernungsbild als radarspezifische Reliefverschiebung verkürzt wiedergegeben und umgekehrt (siehe Abbildung 69).

Ziel der Geo- und Orthorektifizierung ist das Herstellen der korrekten geometrischen Beziehung zwischen einem Zielobjekt auf der Erdoberfläche und der Abbildung auf dem Sensorbild unter Berücksichtigung der Geländeoberfläche. Zunächst wird der Zusammenhang zwischen dem Zielobjekt und seiner Abbildung im Sensorbild unter Annahme einer flachen Geländeoberfläche hergestellt. Hierzu wird die Kenntnis der Sensorlage und Position zum Aufnahmezeitpunkt jeder Bildzeile zum Aufnahmezeitpunkt sowie ein Sensormodell benötigt, welches die Ausbreitungscharakteristik der Mikrowellenstrahlung in Bezug auf das genutzte Sensorsystem modelliert. Die radarspezifische Reliefverschiebung in Form von geometrischen Verzerrungen in Zeilenrichtung lässt sich im Rahmen einer Orthorektifizierung durch Nutzung der z.B. aus dem Phaseninterferogrammen abgeleiteten Geländehöhe des Zielobjektes unter Kenntnis der Sensorlageinformation und des Sensormodells korrigieren.

Ebenso wie bei chemo-optischen und elektro-optischen Fernerkundungssensoren gibt es für SAR-Intensitätsbilder die Möglichkeit der direkten und indirekten Georeferenzierung. Bei der direkten Georeferenzierung werden mittels Information zur Lage und Position des Sensors im Raum (abgeleitet aus INS- und GPS-Aufzeichnungen) die Intensitätsaufzeichnungen in ein Landeskoordinatensystem transformiert. Zur indirekten Georeferenzierung werden zusätzlich GCPs genutzt. Aufgrund der Darstellung im Radar-Intensitätsbild können jedoch natürliche GCPs in der Regel nicht genutzt werden. GCPs müssen durch spezielle Radarreflektoren mit besonderem, sich von der umgebenden Oberfläche stark unterscheidenden Reflektionscharakteristika signalisiert werden, so genannten Corner Reflectors. Dies erleichtert ihre visuelle Identifizierung im Radarintensitätsbild.

Die Positionsgenauigkeit der Georeferenzierung von Intensitätsbilder hängt weitgehend von der Flughöhe des Sensors ab. Eine geringere Flughöhe lässt bessere Positionsgenauigkeit zu wegen

- besserer Signal-to-Noise Ratio (geringeres Rauschen).
- kleinerem Fehler des Hebelarms.

[Int1999]

Ebenso wie bei chemo-optischen als auch elektro-optischen Sensoren hängt die Positionsgenauigkeit der indirekten Georeferenzierung wesentlich von der Positionsgenauigkeit der GCPs ab.

Im folgenden Kapitel wird zunächst die Positionsgenauigkeit der kommerziell erhältlichen SAR-Intensitätsbilder im Rahmen eines Abgleichs der Produktspezifizierung mit den in Kapitel 8.5.2 abgeleiteten Anforderung an die Positionsgenauigkeit der Georeferenzierung verglichen. Um die zu erreichende Positionsgenauigkeit unabhängig von den Herstellerangaben beurteilen zu können, werden im darauf folgenden Kapitel 8.5.3.3.2 die Ergebnisse publizierter wissenschaftlicher Untersuchungen zur Positionsgenauigkeit von SAR-Intensitätsbildern untersucht und mit der Anforderung an die Positionsgenauigkeit der Georeferenzierung verglichen. Eigene Untersuchungen zur erreichbaren Positionsgenauigkeit fließen im Rahmen der Falluntersuchung in Kapitel 8.5.3.3.3 ein.

Abschließend werden die Ergebnisse der Untersuchung der Produkthanforderungen, der publizierten wissenschaftlichen Untersuchungen sowie der Falluntersuchungen zusammengefasst und bewertet.

### 8.5.3.3.1 Abgleich der Anforderungen mit Produktspezifikationen

Der folgende Abgleich der Anforderungen an die Positionsgenauigkeit von SAR-Fernerkundungsdaten mit der Produktspezifikation erfolgt basierend auf den von den Sensorbetreibern bzw. den Sensordaten vertreibenden Institutionen publizierten Angaben. Die Angaben zur relativen Positionsgenauigkeit beziehen sich auf die horizontale Positionsgenauigkeit des SAR-Intensitätsbildes.

Sensor-system	Sensor-plattform	Produkt	Art der Georeferenzierung	Beste verfügbare räumliche Auflösung [m]	Relative Positions-genauigkeit RMSE [m]	Relative Positions-genauigkeit CE90 [m]	Anmerkung
Intermap <b>STAR 3i</b> [Int2007] [Int2004]	Flugzeug	ORI	Direkt	Abhängig von Flughöhe, bis zu 1.0	2.0	3.3	Genauigkeit abhängig von der Genauigkeit des zur Orthorektifizierung genutzten Geländemodells
Aerosensing <b>AeS-1</b> [Aer2000]	Flugzeug	SAR Magnitude	Direkt	Abhängig von Flughöhe, bis zu 0.5	Keine Angabe	Keine Angabe	Genauigkeit abhängig von der Genauigkeit des zur Orthorektifizierung genutzten Geländemodells
CCRS <b>Radarsat 1</b> [CCR2007]	Satellit	Fine SSG	Direkt	6.25	< 1500	> 1500	Fine SPG Produkt mit indirekter Georeferenzierung sowie zusätzlicher Orthorektifizierung erhältlich; keine Angabe zur Positionsgenauigkeit verfügbar
ESA <b>ERS-2</b> [Kon2003]	Satellit	PRI	Direkt	30	ca 200	Ca. 350	

Sensor-system	Sensor-plattform	Produkt	Art der Georeferenzierung	Beste verfügbare räumliche Auflösung [m]	Relative Positionsgenauigkeit RMSE [m]	Relative Positionsgenauigkeit CE90 [m]	Anmerkung
ESA Envisat	Satellit	ASAR Level 1B Ellipsoid Geocoded Image (GEC)		30	Keine Angabe	Keine Angabe	

Tabelle 36: Abgleich der Anforderungen an Positionsgenauigkeit mit Produktspezifikationen von SAR-Fernerkundungssystemen

Die erforderliche Positionsgenauigkeit nach Georeferenzierung von 4.95m wird laut Produktbeschreibungen nur von dem flugzeuggestützten, räumlich hochauflösenden SAR-Fernerkundungssensor STAR 3i erreicht wird.

Die untersuchten satellitengestützten Sensoren erfüllen laut Produktbeschreibung die erforderliche Positionsgenauigkeit nach Georeferenzierung von 4.95m nicht.

Für den satellitengestützten Sensor Envisat der ESA waren keine Produktspezifikationen zur horizontalen Positionsgenauigkeit des Intensitätsbildes verfügbar. Für den flugzeuggestützten SAR-Fernerkundungssensor AeS-1 waren ebenfalls keine Produktspezifikationen bzgl. der Positionsgenauigkeit des Intensitätsbildes verfügbar; es wird jedoch wegen seiner dem STAR 3i Sensor ähnlichen Leistung davon ausgegangen, dass er die Anforderung an Positionsgenauigkeit erreichen kann.

### 8.5.3.3.2 Ergebnisse publizierter wissenschaftlicher Untersuchungen

Zur Verifizierung und Vervollständigung der in Kapitel 8.5.3.2.1 aufgeführten Angaben zur Positionsgenauigkeit der Produktspezifikationen werden im folgenden tabellarisch verschiedene wissenschaftliche Publikationen zu diesem Thema, die Art der bei der Untersuchung genutzten geometrischen Korrektur und Georeferenzierung sowie die Ergebnisse bzgl. der horizontalen Positionsgenauigkeit aufgeführt.

Sensor-system	Sensor-plattform	Produkt	Art der Georeferenzierung	Wissenschaftlicher Beitrag	Relative Positionsgenauigkeit CE90 [m]
Intermap <b>STAR 3i</b>	Flugzeug	ORI	Direkt	[Tig2003]	2.0 – 2.9
Intermap <b>STAR 3i</b>	Flugzeug	ORI	Direkt	[Int2003]	4.1
Aerosensing <b>AeS-1</b>	Flugzeug	Intensitätsaufzeichnung	Indirekt	[BLV2000]	1.8
ESA <b>Envisat</b>	Satellit	ASAR IMS	Direkt	[Kos2002]	6.6

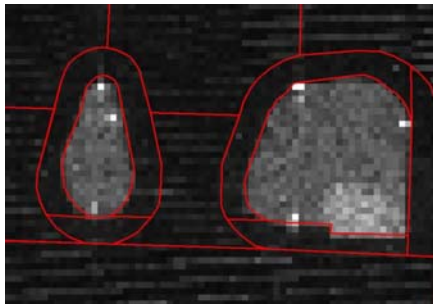
Tabelle 37 Evaluierung der Anforderungen an Positionsgenauigkeit mit publizierter wissenschaftlichen Ergebnissen zur Positionsgenauigkeit von SAR-Fernerkundungssystemen

Die Ergebnisse der wissenschaftlich publizierten Untersuchungen stützen die Aussagen der Produktspezifikationen bzgl. des flugzeuggestützten SAR-Fernerkundungssensors STAR 3i von Intermap. Auch der flugzeuggestützte SAR-Fernerkundungssensor AeS-1 erfüllt die Anforderung an horizontale Positionsgenauigkeit, allerdings waren nur Aussagen zur horizontalen Positionsgenauigkeit mittels indirekter Georeferenzierung verfügbar.

Der satellitengestützte SAR-Fernerkundungssensor Envisat der ESA erreicht mit seinem ASAR IMS-Produkt eine horizontale Positionsgenauigkeit von 6.6m, erfüllt damit jedoch die Anforderungen an Positionsgenauigkeit nach Georeferenzierung von 4.95m nicht.

### 8.5.3.3.3 Falluntersuchung:

Im folgenden wird die horizontale Positionsgenauigkeit der Georeferenzierung der ORI-Intensitätsbilder des Intermap STAR 3i-Sensors am Beispiel des Flughafens Reno, Nevada untersucht. Hierzu wurden als Referenzdaten Elemente der Flughafendatenbank Reno auf das georeferenzierte Intensitätsbild überlagert:



KRNO Rollwege A, B, L




KRNO Landebahnende 07

Quelle: Eigene Grafik

Abbildung 121: Überlagerung von Elementen der Flughafendatenbank Reno, Nevada auf das Intermap Star 3i ORI-Intensitätsbild

Zum Ermitteln des Positionsfehlers wurden an insgesamt 24 über den gesamten Flughafen verteilten Punkten Kontrollmessungen zwischen der Position von Objekten in der Flughafendatenbank und in dem ORI-Intensitätsbild durchgeführt. Die Positionsgenauigkeit der Flughafendatenbank von 1m wurde zur Ermittlung der Positionsfehlers mit berücksichtigt.

Flughafen	Reno, Nevada (KRNO)
Anzahl Kontrollmessungen	24
Positionsgenauigkeit (RMSE):	2.3 m
Standardabweichung:	0.6
Positionsgenauigkeit (CE90):	3.9 m
Verteilung der Kontrollpunkte	

Quelle: Eigene Grafik

Tabelle 38: Evaluierung der Positionsgenauigkeit der Georeferenzierung von Star 3i

Die Evaluierung stützt die Angaben zur Positionsgenauigkeit von STAR 3i ORI Intensitätsbildern der Produktspezifikationen und der publizierten wissenschaftlichen Untersuchungen.

#### 8.5.3.3.4 Zusammenfassung der Ergebnisse

Beide untersuchten flugzeuggestützte SAR-Fernerkundungssensoren STAR 3i und AeS-1 erfüllen für die Intensitätsaufzeichnungen die Anforderung an Positionsgenauigkeit nach Georeferenzierung von 4.95m. Zu letzterem waren allerdings nur Aussagen zur horizontalen Positionsgenauigkeit mittels indirekter Georeferenzierung verfügbar.

Die untersuchten satellitengestützten SAR-Fernerkundungssensoren erfüllen nicht die Anforderungen an Positionsgenauigkeit von georeferenzierten Intensitätsbildern.

Abgeleitet aus der Analyse der Produktspezifikationen, der wissenschaftlichen Publikationen und der Falluntersuchungen ergibt sich folgendes Bild:

Sensor-system	Sensor-plattform	Beste räumliche Auflösung [m]	Produkt Level	Art der Georeferenzierung	Relative Positionsgenauigkeit CE90 [m]
Intermap <b>STAR 3i</b>	Flugzeug	Abhängig von Flughöhe, bis zu 1.0	ORI	Direkt	2.0-4.1
Aerosensing <b>AeS-1</b>		Abhängig von Flughöhe, bis zu 0.5	SAR Magnitude	Indirekt	1.8
CCRS <b>Radarsat 1</b>	Satellit	6.25	Fine SSG	Direkt	> 1500
ESA <b>ERS-2</b>		30	PRI	Direkt	Ca. 350
ESA <b>Envisat</b>		30	ASAR IMS	Direkt	6.6

Tabelle 39: Übersicht der die Anforderungen an Positionsgenauigkeit erfüllenden elektro-optischen Fernerkundungssensoren

#### 8.5.3.4 Positionsgenauigkeit der Georeferenzierung von LIDAR

LIDAR-Fernerkundungssysteme dienen in erster Linie zum Einmessen von Höhenpunkten. Messpunktswolken von in dichtem Abstand zueinander liegenden Höhenmesspunkten können durch räumliche Interpolationsalgorithmen in ein gleichmäßiges Bildraaster transformiert und als Geländemodell wiedergegeben werden. Über die Messung der Reflektionsintensität jedes Messpunktes kann jedoch auch ein Intensitätsbild erzeugt werden, welches zur Objektidentifizierung und -Einmessung genutzt werden kann. Die folgende Untersuchung der Positionsgenauigkeit der Georeferenzierung von LIDAR-Datenprodukten beschränkt sich daher auf LIDAR-Intensitätsbilder.

Ein LIDAR-Sensorsystem besteht aus einem Laserscanner, einer inertialen Navigationseinheit und einem Satellitennavigationssystem (in der Regel GPS). Zur Georeferenzierung von LIDAR-Intensitätsbildern wird ausschliesslich direkte Georeferenzierung genutzt. Hierzu wird die Positionsinformation des GPS im kinematischen Differentialmodus zur hochgenauen Bestimmung der Sensorposition genutzt; die Information der inertialen Navigationseinheit wird genutzt, um zum einen die genaue 3-dimensionale Lageinformation des Sensors abzuleiten, und um zum anderen eine höhere zeitliche Auflösung der Positionslösung zu erreichen und Fehler der GPS-Positionsbestimmung zu korrigieren. Die Kombination der inertialen Navigationseinheit mit differentiellen GPS-Messungen erlaubt die hochgenaue Einmessung von durch den Laser bestrahlten Punkten auf der Erdoberfläche mit absoluten horizontalen Positionsgenauigkeiten von ca. 0.1-1.2 m RMSE, entsprechend 0.2m – 2m CEP 90 [Cam2003] [Hod2004]. Die horizontale Positionsgenauigkeit ist hierbei eine Funktion der Flughöhe [Hod2004].

Der Positionsfehler der direkten Georeferenzierung von LIDAR-Intensitätsmessungen setzt sich aus dem Fehler der positions- und lagebestimmenden Instrumente sowie des Fehlers des Laserscanners zusammen.

Der Fehler des Laserscanners kann in zwei Kategorien unterteilt werden:

- Entfernungsmessfehler: Funktion der Laserpuls-Anstiegszeit, der Signal-to-Noise Ratio sowie der Lichtgeschwindigkeit
- Winkelmessfehler: Sehr gering, Grössenordnung  $10^{-3}^\circ$

[Cam2003]

Der Fehler der differentiellen kinematischen GPS-Messung hängt von verschiedenen Faktoren ab, wie z.B.:

- der Satellitengeometrie.
- Multipath-Effekten.
- der Basislinie der differentiellen kinematischen Vermessung zwischen Rover und Referenzstation.
- der Amplitude der Flugzeugbewegungen.
- der Fähigkeit der Postprocessingsoftware, Sprünge der Trägerphasenzyklen zu detektieren und korrigieren.

Typische erreichbare Positionsgenauigkeiten der differentiellen kinematischen GPS-Messung für eine LIDAR-Befliegung mit geringen Amplituden der Flugzeugeigenbewegung beträgt 0.05 – 0.15 m [Cam2003].

Die im Rahmen von LIDAR-Fernerkundungssystemen genutzten inertialen Navigationseinheiten sind in der Regel mittel- bis hochwertige Einheiten, welche in Kombination mit der kinematischen GPS-Messung dazu genutzt werden, die Lage des



Sensors festzustellen. Roll- und Pitch-Fehler liegen für diese Einheiten in der Grössenordnung von  $0.008^\circ$  RMSE und Heading-Fehler in der Grössenordnung von  $0.015^\circ$  RMSE nach dem Postprocessing mit differentiellen kinematischen GPS-Aufzeichnungen.

Unter Annahme der oben genannten Fehleraufteilung auf die unterschiedlichen Teilsysteme wird die horizontale Positionsgenauigkeit des LIDAR-Intensitätsbildes wesentlich von der vertikalen und horizontalen Positionsgenauigkeit der differentiellen kinematischen GPS-Vermessung bestimmt [Cam2003].

Im folgenden Kapitel wird die Positionsgenauigkeit der Intensitätsbilder von kommerziell verfügbaren LIDAR-Sensoren im Rahmen eines Abgleichs der Produktspezifizierung mit den in Kapitel 8.5.2 abgeleiteten Anforderung an die Positionsgenauigkeit der Georeferenzierung verglichen. Um die zu erreichende Positionsgenauigkeit unabhängig von den Herstellerangaben beurteilen zu können, werden im darauf folgenden Kapitel 8.5.3.4.1 die Ergebnisse publizierter wissenschaftlicher Untersuchungen zur Positionsgenauigkeit von LIDAR-Intensitätsbildern untersucht und mit der Anforderung an die Positionsgenauigkeit der Georeferenzierung verglichen.

#### 8.5.3.4.1 Abgleich der Anforderungen mit Produktspezifikationen

Der folgende Abgleich der Anforderungen an die Positionsgenauigkeit von LIDAR-Intensitätsaufzeichnungen mit der Produktspezifikation erfolgt basierend auf der von den Sensorbetreibern bzw. der den Sensordaten verteilenden Institutionen publizierten Angaben. Die Angaben zur relativen Positionsgenauigkeit beziehen sich auf die horizontale Positionsgenauigkeit der LIDAR-Intensitätsaufzeichnung.

Sensor-system	Sensor-plattform	Produkt	Art der Georeferenzierung	Beste verfügbare räumliche Auflösung [m]	Relative Positionsgenauigkeit RMSE [m]	Relative Positionsgenauigkeit CE90 [m]	Anmerkung
Optech <b>ALTM 3100EA</b> [Opt2006]	Flugzeug	Intensitätsaufzeichnung	Direkt	< 0.6	0.7	1.1	Positionsgenauigkeit bei max. Einsatzhöhe von 3500 m
Leica <b>ALS50</b> [Lei2006]		Intensitätsaufzeichnung	Direkt	< 0.6	0.65	1.1	Positionsgenauigkeit bei max. Einsatzhöhe von 6000 m
Riegl <b>LMS-Q560</b> [Rie2006]		Intensitätsaufzeichnung	Direkt	< 0.6	Keine Angabe	Keine Angabe	

Tabelle 40: Abgleich der Anforderungen an Positionsgenauigkeit mit Produktspezifikationen von LIDAR-Fernerkundungssystemen

Das Ergebnis des Abgleichs der Anforderungen an die horizontale Positionsgenauigkeit mit den Produktspezifikationen von LIDAR-Fernerkundungssystemen zeigt, dass die Anforderungen an horizontale Positionsgenauigkeit von 4.95 m sowohl von dem Optech ALTM 3100EA Sensor als auch von dem Leica ALS50 Sensor im Rahmen ihrer operationellen Einsatzhöhen erfüllt werden. Für den Riegl LMS-Q560 Sensor waren keine Angaben zur horizontalen Positionsgenauigkeit verfügbar; es wird jedoch auch für diesen Sensor davon ausgegangen, dass die Anforderungen erfüllt werden.

Obwohl weder Ergebnisse publizierter wissenschaftlicher Untersuchungen zu den betrachteten Sensoren zur Verfügung standen, noch mangels Verfügbarkeit von Daten Falluntersuchungen durchgeführt werden konnten, wird basierend auf den allgemeinen Aussagen der Literatur zur horizontalen Positionsgenauigkeit von LIDAR-Fernerkundungssystemen als auch auf den Aussagen der Produktspezifikationen davon ausgegangen, dass die benötigte Positionsgenauigkeit von 4.95m durch alle untersuchten LIDAR-Sensoren im Rahmen ihres operationellen Einsatzbereiches erreicht wird.

#### **8.5.4 Zusammenfassung und Beurteilung der Ergebnisse der Analyse der Positionsgenauigkeit bei Nutzung von Methoden der Fernerkundung zum Erzeugen von Flughafendatenbanken**

Der maximal zulässige Positionsfehler der Georeferenzierung von Fernerkundungssensoren zum Erstellen von Flughafendatenbanken der Kategorie *Medium* wurde unter Berücksichtigung eines induzierten Positionsfehlers während der Objektextraktion auf 4.95m festgelegt.

Im Anschluss wurde untersucht, ob die erreichbare Positionsgenauigkeit der Georeferenzierung der verschiedenen untersuchten Fernerkundungsverfahren und Sensorsysteme diese Zielgenauigkeit erreichen kann. Hierbei wurde wie folgt vorgegangen:

1. Zunächst wurden für die verschiedenen Sensorgruppen (chemo-optisch, elektro-optisch, SAR, LIDAR) allgemeine Literaturangaben zur erreichbaren horizontalen Positionsgenauigkeit der direkten und indirekten Georeferenzierung sowie die Fehlerquellen untersucht.
2. Im nächsten Schritt wurden die Angaben zur horizontalen Positionsgenauigkeit der Produktspezifikationen der verschiedenen untersuchten Sensorsysteme aufgeführt und mit den allgemeinen Literaturangaben zur Positionsgenauigkeit in Bezug gesetzt.
3. Zur Überprüfung der Produktspezifikationen einzelner Sensoren wurden die Ergebnisse publizierter wissenschaftlicher Arbeiten zur horizontalen Positionsgenauigkeit spezifischer Sensorsysteme dargestellt.
4. Je nach Datenverfügbarkeit wurden in Falluntersuchungen stichprobenartig die durch ein spezifisches Verfahren der Georeferenzierung erreichbare Positionsgenauigkeit untersucht und mit den Ergebnissen von 1-3 verglichen.

Im Ergebnis der Untersuchung zeigt sich eine starke Korrelation der erreichbaren Positionsgenauigkeit mit der Flughöhe der Sensorplattform und der räumlichen Auflösung des Sensors. Unabhängig von der Sensorgruppe (chemo-optisch, elektro-optisch, SAR, LIDAR) konnten alle untersuchten flugzeuggestützten Sensoren und Verfahren die Anforderung an Positionsgenauigkeit der Georeferenzierung erfüllen. Dagegen konnten nur wenige satellitengestützte höchstauflösende elektro-optische Fernerkundungssensoren die Anforderungen erfüllen.

##### Chemo-optische Fernerkundungssensoren:

Zum Bestimmen der Positionsgenauigkeit der Georeferenzierung von chemo-optischen Sensorsystemen wurden wegen geringer Abweichungen der Systemspezifikationen nicht die Kamerasysteme und deren Datenprodukte, sondern die verschiedenen Verfahren der Georeferenzierung und die hierdurch erreichbare Positionsgenauigkeit untersucht. Hierbei wurde lediglich der Fall der flugzeuggestützten Luftbildkamera untersucht; die Positionsgenauigkeit der Georeferenzierung von satellitengestützten Kameras wurde nicht untersucht. Das Resultat der Untersuchung zeigt, dass durch alle untersuchten direkten und

indirekten Verfahren zur Georeferenzierung von chemo-optischen Sensoren die erforderliche Positionsgenauigkeit erreicht wird.

#### Elektro-optische Fernerkundungssensoren:

Bei elektro-optischen Sensoren zeigt sich eine ausgeprägte Abhängigkeit der erreichbaren Positionsgenauigkeit nicht nur von der Flughöhe der Sensorplattform und der räumlichen Auflösung des Sensors, sondern auch von dem genutzten Verfahren zur Georeferenzierung:

- Die flugzeuggestützten Sensoren (HRSC-1 und ADS-40) konnten die erforderliche Positionsgenauigkeit sowohl durch direkte als auch durch indirekte Georeferenzierung erreichen.
- Von den untersuchten satellitengestützten Sensoren konnten lediglich die Sensoren mit höchster räumlicher Auflösung < 1m (IKONOS II, GeoEye-1, Quickbird-2, Worldview-1, EROS A) die Anforderung durch indirekte Georeferenzierung mittels GCPs erfüllen. Da bei Verfahren der direkten Georeferenzierung die Größe des Positionsfehlers eine Funktion des Abstandes zur Erdoberfläche ist, konnten wegen der großen Flughöhe von satellitengestützten Sensoren selbst höchstauflösende Sensoren nicht die erforderliche Positionsgenauigkeit mittels direkter Georeferenzierung liefern.
- Verfahrensunabhängig konnten alle geringer auflösenden elektro-optischen Sensoren (Landsat 7, SPOT 5) die Anforderung an Positionsgenauigkeit nicht erfüllen.

Für einige geringer auflösende Sensoren konnten weder Produktspezifikationen noch wissenschaftliche Publikationen zur horizontalen Positionsgenauigkeit der Georeferenzierung gefunden werden. Es wird jedoch wegen der ähnlichen Fehlerquellen und Methodik davon ausgegangen, dass diese Sensoren ebenfalls nicht die Anforderung an Positionsgenauigkeit erfüllen.

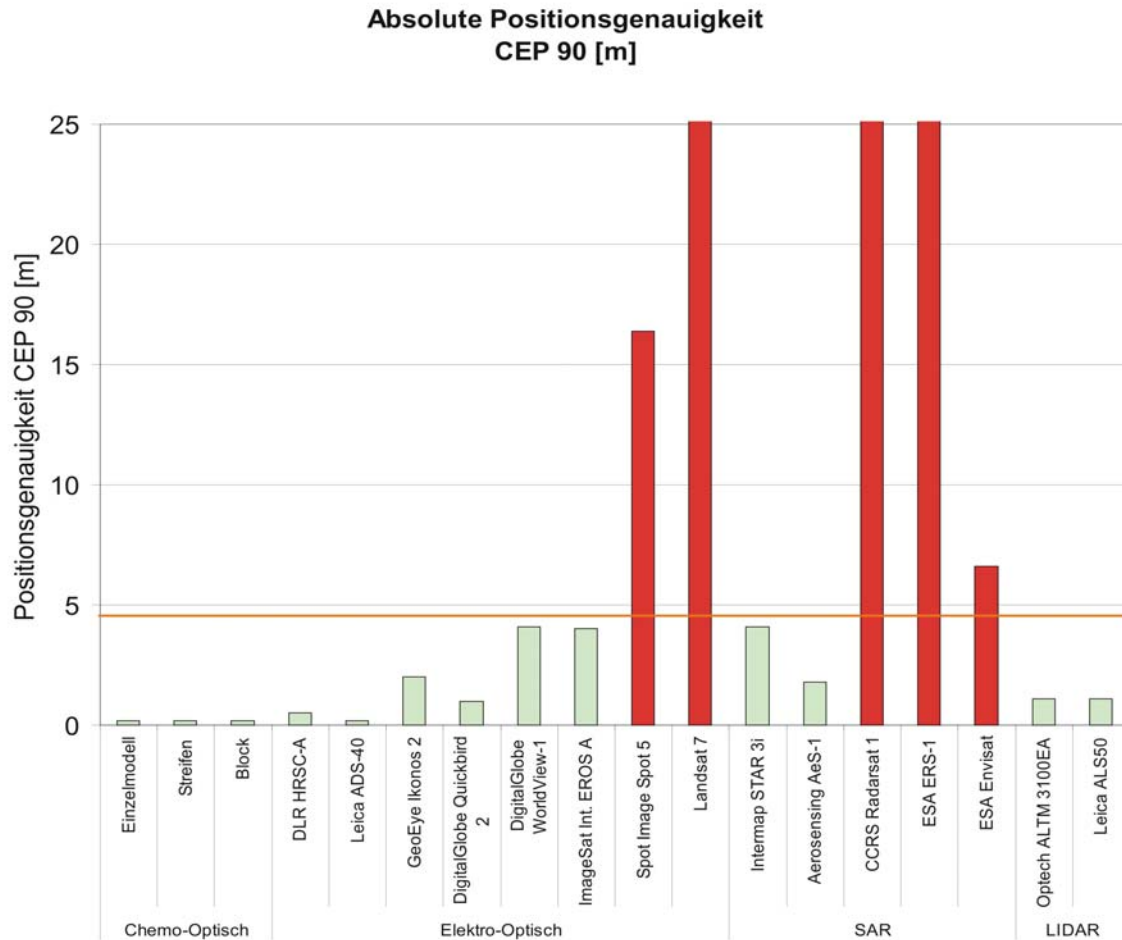
#### SAR-Fernerkundungssensoren:

Bei den untersuchten SAR-Fernerkundungssensoren wurden ausschließlich direkte Verfahren zur Georeferenzierung genutzt. Beide flugzeuggestützten SAR-Fernerkundungssensoren STAR 3i und AeS-1 erfüllen für die Intensitätsaufzeichnungen die Anforderung an Positionsgenauigkeit nach Georeferenzierung von 4.95m. Alle übrigen untersuchten satellitengestützten Sensorsysteme (Radarsat 1, ERS-1, Envisat) konnten die Anforderung nicht erfüllen.

#### LIDAR-Fernerkundungssensoren:

Bei allen untersuchten LIDAR-Sensorsystemen handelt es sich um flugzeuggestützte Systeme. Die Positionsgenauigkeit der direkten Georeferenzierung der LIDAR-Intensitätsaufzeichnungen korreliert ebenso wie bei allen anderen untersuchten Sensoren mit der Flughöhe der Sensorplattform. Verfahren der indirekten Georeferenzierung werden nicht genutzt. Alle untersuchten Sensoren erfüllten die Anforderungen an Positionsgenauigkeit der Georeferenzierung.

Abbildung 122 zeigt die erreichbare Positionsgenauigkeit der Georeferenzierung der untersuchten Fernerkundungssensoren im Vergleich:



Quelle: Eigene Grafik

Abbildung 122: Erreichbare Positionsgenauigkeit der Georeferenzierung der untersuchten Fernerkundungssensoren im Vergleich

Bei den in Abbildung 122 aufgeführten horizontalen Positionsfehlern handelt es sich um den kleinstmöglichen Positionsfehler, der unter Nutzung verschiedener Verfahren entweder in der Produktspezifikation, in publizierten wissenschaftlichen Untersuchungen oder durch Falluntersuchungen nachgewiesen werden konnte. Der Positionsfehler bezieht sich auf ebenerdige Objekte; für Volumenobjekte (Masten, Gebäude, etc.) muss bei allen untersuchten Verfahren ein Positionsfehler durch Reliefverschiebung berücksichtigt werden. Die Größe dieses Fehlers ist abhängig vom Aufnahmewinkel und kann durch entsprechende Missionsplanung minimiert werden. Für Aufnahmen im Nadir (Senkrechtaufnahmen) ist er gering, mit Abweichung vom Nadir nimmt er zu. Bezüglich der Extraktion von Flughafenobjekten muss dieser Positionsfehler lediglich für die Objektklasse *Vertical Polygon Objects* berücksichtigt werden. *Vertical Line Objects* und *Vertical Point Objects* können in der Regel an der Basis extrahiert werden.



## **8.6 Analyse der Verfügbarkeit sowie Aufwandsabschätzung**

Die Verfügbarkeit der verschiedenen Methoden der Fernerkundung zur Erstellung von Flughafendatenbanken wird in Bezug auf folgende Faktoren untersucht:

- Lokale Verfügbarkeit.
- Allgemeine und verfahrensspezifische Einschränkungen.
- Wetterabhängigkeit.

Hinsichtlich der Untersuchung des Aufwandes zum Erstellen von Flughafendatenbanken wurde lediglich der Aufwand zum Erstellen der Vektorkomponente betrachtet. Der Aufwand zum Erstellen der notwendigen beschreibenden Information (Attribute) wurde in dem Rahmen dieser Arbeit nicht betrachtet und bleibt weiteren Untersuchungen vorbehalten.

### **8.6.1 Chemo-optische Fernerkundungssensoren**

#### **8.6.1.1 Verfügbarkeit**

##### **Lokale Verfügbarkeit**

Flugzeuggestützte chemo-optische Fernerkundungssensoren sind weltweit verfügbar bzw. können mittels der Sensorplattform Flugzeug an fast jeden beliebigen Ort weltweit transportiert werden. Es kann davon ausgegangen werden, dass flugzeuggestützte Sensorsysteme in Industrieländern lokal und in Entwicklungsländern zumindest regional verfügbar sind. Von entscheidender Bedeutung zur Nutzung lokaler Systeme ist die Verfügbarkeit von aktuellen Kalibrierprotokollen der Kamera, um die erforderliche Positionsgenauigkeit sicherstellen zu können.

##### **Allgemeine und verfahrensspezifische Einschränkungen**

Die Art des Bildfluges und die spätere Anwendung des Luftbildes setzen bestimmte Beleuchtungsverhältnisse und das Erfliegen einer bestimmten Flughöhe voraus. Hieraus ergeben sich Beschränkungen hinsichtlich Jahreszeit, Tageszeit und Wetter, bei dem Bildflüge durchgeführt werden können.

Die Jahreszeit ist abhängig von der späteren Nutzung der Bilder zur Objektextraktion. In Ländern mit ausgeprägten Jahreszeiten kann durch Befliegung im Herbst z.B. Verdeckungen der Erdoberfläche durch Belaubung der Bäume vermieden werden. Zur Extraktion von Flughafendatenbankobjekten spielt die Belaubung der Bäume jedoch keine Rolle. Einzige jahreszeitenspezifische Einschränkung ist, dass die Bedeckung von Objekten auf der Erdoberfläche durch Schnee oder Eis vermieden werden muss. Hierdurch reduziert sich der Zeitrahmen für mögliche Befliegungen für Flughäfen in den Polarregionen auf den Sommer.

Tageszeitliche Einschränkungen beziehen sich auf das Vermeiden von starkem Schattenwurf durch Gebäude und das Verdecken anderer Objekte im Gebäudeschatten. Die Tageszeit sollte so gewählt werden, dass die Schattenlängen nicht das 3.5-fache der Objekthöhen erreichen [Kra1994].

### **Wetterabhängigkeit**

Wolkenbedeckung beeinflusst den Einsatz von chemo-optischen Sensoren. Klarer Himmel mit einer maximalen Bewölkung von 2/8 Bewölkung oder diffuses Licht unter geschlossener hoher Wolkendecke (Bewölkung >7/8) sind optimale Bedingungen für Bildflüge. Flüge unter geschlossener hoher Wolkendecke sind im Sommer möglich; sie werden gelegentlich für Stadtbefliegungen gewünscht, um Bildausfälle durch Schlagschatten zu minimieren und ergeben relativ kontrastschwache Bilder [Kra1994].

Aus der Einschränkung bzgl. der max. Bewölkung ergibt sich lediglich eine Einschränkung der lokalen Nutzbarkeit von flugzeuggestützten Fernerkundungssensoren in Gebieten mit dauerhafter niedriger Wolkendecke, wie z.B. in nördlichen Küstenregionen. Zur Planung und Durchführung von Bildflügen muss hier oftmals eine kurzfristige lokale Wetterbesserung abgewartet werden, was sich auf die Kosten der Befliegung niederschlagen kann. Eine Einschränkung bzgl. der Nutzbarkeit in tropischen Regionen ergibt sich nicht zwangsläufig, da die Untergrenze der Bewölkung oftmals hoch genug ist, um unter der geschlossenen Wolkendecke Bildflüge durchzuführen.

#### **8.6.1.2 Aufwandsabschätzung**

Der Gesamtaufwand zur Erstellung von Flughafendatenbankobjekten aus den Luftbildern setzt sich aus folgenden Komponenten zusammen:

- Planung und Durchführung des Bildfluges
- Prozessieren des Bildmaterials
- Georeferenzierung
- Objektextraktion
- Qualitätsüberprüfung der extrahierten Objekte und Korrektur von Fehlern

Die folgende Angaben sind Abschätzungen und basieren auf Industrieangaben zu Kosten von Bildflügen, Bildprozessierung und Georeferenzierung sowie auf verschiedenen Untersuchungen zur Datenerhebung für Autonavigationssystemen auf der Grundlage von Papierkarten [Bil1997] und eigenen Erfahrungswerten zur Erstellung von Flughafendatenbanken basierend auf chemo-optisch und elektro-optisch akquiriertem Bildmaterial.

- Der Aufwand und die Kosten zur Planung und Durchführung des Bildfluges wird massgeblich bestimmt durch die Kosten zur Nutzung des Fluggerätes für den Bildflug. Im Vergleich zu satellitengestützten Fernerkundungssystemen muss der hierzu notwendige Aufwand für flugzeuggestützte Luftbildsensoren als hoch angesehen werden. Er ist abhängig von der lokalen Verfügbarkeit des Sensorsystems, der lokalen Wettersituation, der Größe des zu befliegenden Gebietes und der zu erzielenden räumlichen Auflösung. Für eine Befliegung eines Flughafens mittlerer Grösse wird von Kosten in der Größenordnung von ca. 5.000 –10.000 EUR ausgegangen.
- Die Prozessierung des Bildmaterials umfasst das Digitalisieren der chemo-optischen Bildbasis sowie evt. notwendige radiometrische Korrekturen. Durch hohen Automatisierungsgrad ist der hierzu benötigte Aufwand relativ gering.
- Die Georeferenzierung umfasst die interne Orientierung sowie die Aerotriangulation des Bildmaterials. Werden die Bilder zur Aerotriangulation ohne GCPs mittels Aufzeichnungen von differenziellem GPS und hochgenauer Inertialsysteme im Raum orientiert (direkte Georeferenzierung), reduziert sich der Flugaufwand und die Arbeit im Gelände erheblich, da eventuelle Querstreifen und GCPs nicht erforderlich sind.



Zeitaufwand und Kosten werden geringer. Da zur indirekten Georeferenzierung (Aerotriangulation mittels GCPs) 4 oder mehr GCPs benötigt werden, die in den Ecken und Rändern des Blockes verteilt sind, sowie zusätzliche Checkpunkte zum Überprüfen der erreichten Positionsgenauigkeit der Georeferenzierung, und diese unter Umständen signalisiert werden müssen, erhöht sich der Aufwand hierbei beträchtlich.

- Der Aufwand zur Objektextraktion ist abhängig von der Anzahl und der Komplexität der zu extrahierenden Objekte. Zum Erstellen einer Flughafendatenbank für einen Flughafen mittlerer Größe müssen ca. 2.000 Elemente, bestehend aus ca. 15.000 Einzelpunkten extrahiert werden. Nach einer Abschätzung von M.F. Goodchild [Bil1997] kann ein Operator eine mittlere Anzahl von 60 Elemente pro Stunde aus einer Karte extrahieren. Eigene Erfahrungswerte lassen diese Anzahl jedoch als zu konservativ erscheinen; im folgenden wird mit 90 Elementen pro Stunde gerechnet.
- Der zeitliche Umfang zur Qualitätsüberprüfung und Korrektur von Fehlern ist abhängig von der Genauigkeit und Sorgfalt des Operators

Arbeitsschritt		Geschätzter Aufwand
Planung und Durchführung des Bildfluges		10h
Prozessieren des Bildmaterials		3h
Georeferenzierung	Direkt	6h
	Indirekt (incl. Einmessung von GCPs)	18h
Objektextraktion		22h
Qualitätsüberprüfung und notwendige Korrekturen		7.2h
Summe	Direkte Georeferenzierung	48.2h (6 Manntage)
	Indirekte Georeferenzierung	60.2h (9 Manntage)

Tabelle 41: Geschätzter Aufwand zum Erstellung von Flughafendatenbankobjekten aus chemo-optischen Luftbildern

Der Gesamtaufwand läge nach dieser Abschätzung bei 48.2h (6 Manntagen) bei direkter Georeferenzierung und 60.2h (9 Manntagen) bei indirekter Georeferenzierung. Zusätzlich zu den reinen Arbeitsaufwänden müssen die Kosten zur Nutzung des Fluggerätes berücksichtigt werden.

Die Verteilung der zeitlichen Anteile der Einzelprozesse am Gesamtprozess zeigt, dass bei flugzeuggestützten Sensoren der Aufwand zur Erstellung der Fernerkundungsbildbasis ebenso hoch ist wie der Aufwand zur Objektextraktion. Dem hingegen liegt der Aufwandsschwerpunkt bei der Nutzung satellitengestützter Sensoren bei der Extraktion der Flughafendatenbankobjekte.

Die Verteilung der zeitlichen Anteile der Einzelprozesse am Gesamtprozess zeigt, dass bei indirekter Georeferenzierung der Aufwand zur Erstellung und Aufbereitung der Fernerkundungsbildbasis annähernd gleichhoch ist wie der Aufwand zur Objektextraktion.

Bei direkter Georeferenzierung reduziert sich der Aufwand zur Erstellung und Aufbereitung der Fernerkundungsbildbasis.

## **8.6.2 Elektro-optische Fernerkundungssensoren**

### **Lokale Verfügbarkeit**

Da flugzeuggestützte elektro-optische Fernerkundungssensoren erst vor wenigen Jahren eingeführt wurden, kann nicht davon ausgegangen werden, dass sie weltweit lokal verfügbar sind, allenfalls regional. Sie können jedoch mittels der Sensorplattform Flugzeug an fast jeden beliebigen Ort weltweit transportiert werden.

Aufzeichnungen satellitengestützter elektro-optischer Sensoren sind weltweit verfügbar. Zur räumlichen Abdeckung der gesamten Erdoberfläche befinden sich die Satelliten in der Regel auf kreisförmigen, polnahen und sonnensynchronen Umlaufbahnen. Da die Satellitenbahn ihre Lage im Raum beibehält, aber die Erdoberfläche unter dieser Bahn aufgrund der Rotation der Erdkugel hindurchwandert, sind die Bodenspuren der aufeinander folgenden Satellitenumläufe etwas gegeneinander versetzt. Die Bahnparameter sind so gewählt, dass nach und nach die ganze Erdoberfläche aufgenommen werden kann und sich der Vorgang nach einer festen Anzahl von Tagen wiederholt (Wiederkehr) bzw. dass eine optimale Periodizität für ein ausgewähltes Gebiet möglich ist.

### **Allgemeine und verfahrensspezifische Einschränkungen**

Es gelten dieselben Einschränkungen wie für chemo-optische Fernerkundungssensoren. Für satellitengestützte elektro-optische Fernerkundungssensoren werden in der Regel sonnensynchrone Umlaufbahnen gewählt, auf denen die Erde überall unter demselben Sonnenwinkel überflogen wird. Dies hat den Vorteil, dass alle Aufzeichnungen nahezu zur selben lokalen Sonnenzeit gemacht werden [Cam1996].

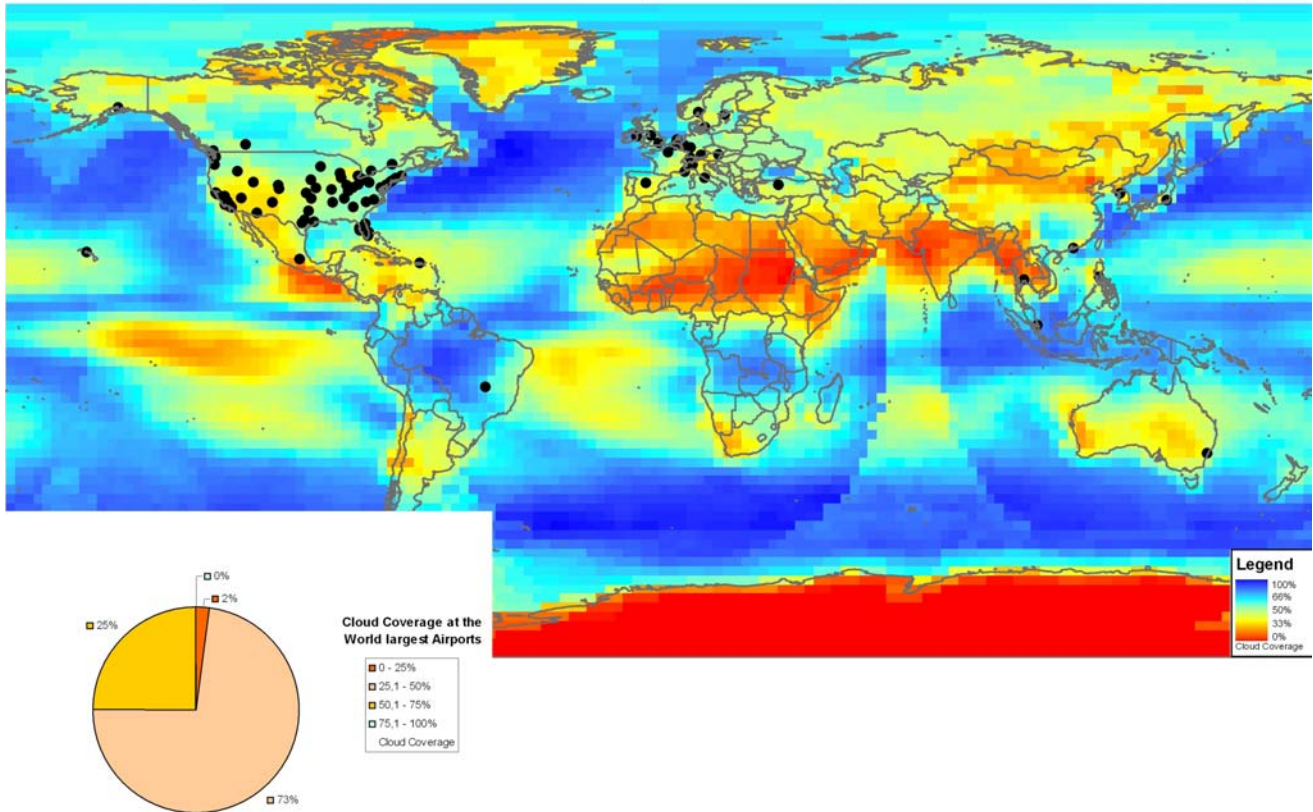
### **Wetterabhängigkeit**

Ebenso wie für chemo-optische Fernerkundungssensoren beeinflusst die Wolkenbedeckung den Einsatz von elektro-optischen Sensoren. Klarer Himmel mit einer maximalen Bewölkung von 2/8 Bewölkung oder diffuses Licht unter geschlossener hoher Wolkendecke (Bewölkung >7/8) sind optimale Bedingungen für Bildflüge. Flüge unter geschlossener hoher Wolkendecke sind im Sommer mittels flugzeuggestützten Fernerkundungssensoren möglich.

Eine Einschränkung besteht für satellitengestützte Sensoren insbesondere für Gebiete mit hoher mittlerer jährlicher Wolkenbedeckungsrate. Um aus der mittleren jährlichen Wolkenbedeckung Rückschlüsse auf die Nutzbarkeit von satellitengestützten elektro-optischen Fernerkundungssensoren schliessen zu können, wurde im folgenden auf eine Wolkenbedeckungskarte, welche den mittleren jährlichen Wolkenbedeckungsgrad weltweit abbildet, die Lage der 100 grössten Flughäfen weltweit überlagert. Zusätzlich wurde eine Zuordnung der betrachteten Flughäfen zu vier Bewölkungsklassen (0%-25%, 26%-50%, 51%-75%, 76-100%) durchgeführt.

Die Wolkenbedeckungskarte wurde basierend auf Daten des International Satellite Cloud Climatology Project (ISCCP) für den Zeitraum Juli 1983 bis Juni 1991 erstellt.

Wolkenbedeckungskarte (1983 to 1991): Jahresmittel und mittlerer jährlicher Bedeckungsgrad der weltweit 100 grössten Flughäfen (1999)



Quelle: Eigene Grafik

Abbildung 123: Jahresmittel und mittlerer jährlicher Bedeckungsgrad der weltweit grössten Flughäfen

Als Ergebnis der Untersuchung wurden die folgenden Zuordnungen zu den Wolkenbedeckungskategorien erstellt:

- 2% der untersuchten Flughäfen besitzen eine mittlere jährliche Wolkenbedeckung zwischen 0-25%
- 73% der untersuchten Flughäfen besitzen eine mittlere jährliche Wolkenbedeckung zwischen 26 bis 50%.
- 25% der untersuchten Flughäfen besitzen eine mittlere jährliche Wolkenbedeckung zwischen 51-75%

Bezüglich der Eignung von satellitengestützten elektro-optischen Fernerkundungssensoren zum Erstellen von Flughafendatenbanken liegt eine Einschränkung lediglich bzgl. der 25% der untersuchten Flughäfen mit einer mittleren jährliche Wolkenbedeckung zwischen 51-75% vor. Bei einem ausreichenden Zeitfenster zur Erstellung der Flughafendatenbank sollte jedoch auch für diese Flughäfen die Nutzung von Bilddaten von satellitengestützten elektro-optischen Fernerkundungssensoren möglich sein.

### 8.6.2.1 Aufwandsabschätzung

Zur Abschätzung des Gesamtaufwandes zum Erstellen von Flughafendatenbankobjekten aus Aufzeichnungen elektro-optischer Fernerkundungssensoren müssen zwei Fälle unterschieden werden:

- 1.) Nutzung flugzeuggestützte elektro-optischer Sensoren
- 2.) Nutzung satellitengestützter elektro-optischer Sensoren

Der Gesamtaufwand setzt sich aus folgenden Komponenten zusammen:

- Planung und Durchführung der Befliegung bzw. Kosten des Erwerbs von Satellitenbildszenen
- Prozessieren des Bildmaterials
- Georeferenzierung
- Objektextraktion
- Qualitätsüberprüfung der extrahierten Objekte und Korrektur von Fehlern

Die folgende Angaben sind Abschätzungen und basieren auf Industrieangaben zu Kosten von Bildflügen, Satellitenbildszenen, Bildprozessierung und Georeferenzierung sowie auf verschiedenen Untersuchungen zur Datenerhebung für Autonavigationssystemen auf der Grundlage von Papierkarten [Bil1997] und eigenen Erfahrungswerten zur Erstellung von Flughafendatenbanken basierend auf chemo-optisch und elektro-optisch akquiriertem Bildmaterial.

- Der Aufwand und die Kosten zur Planung und Durchführung einer Befliegung ist abhängig von der lokalen Verfügbarkeit des Sensorsystems, der lokalen Wettersituation, Größe des zu befliegenden Gebietes und zu erzielende räumliche Auflösung. Für eine Befliegung eines Flughafens mittlerer Größe wird wegen der geringeren Verfügbarkeit von flugzeuggestützten elektro-optischen Sensoren und den hieraus resultierenden höheren Bereitstellungskosten von höheren Kosten ausgegangen als für eine klassische Luftbildbefliegung mit chemo-optischen Sensoren.
- Die Kosten zum Erwerb von Satellitenbildszenen ist abhängig vom Prozessierungslevel des Satellitenbildes. Für höchstauflösende Satellitenbildszenen, welche lediglich radiometrische korrigiert sind, bewegen sich die Kosten im Bereich um ca. 1000-2000 EUR, für georeferenzierte Satellitenbildszenen erhöhen sich die Kosten bis auf ca. 3000 EUR, je nach Positionsgenauigkeit und Art der Georeferenzierung (direkt oder indirekt).
- Die Prozessierung des Bildmaterials umfasst notwendige radiometrische Korrekturen.
- Werden die Bilder zur direkten Georeferenzierung ohne GCPs mittels Aufzeichnungen von differenziellem GPS und hochgenauer Inertialsysteme im Raum orientiert, reduziert sich der Flugaufwand und die Arbeit im Gelände erheblich, da eventuelle Querstreifen und GCPs nicht erforderlich sind und der Arbeitsablauf weitgehend automatisiert ist. Da zur indirekten Georeferenzierung 4 oder mehr GCPs benötigt werden, die in den Ecken und Rändern des Blockes verteilt sind, sowie zusätzliche Checkpunkte zum Überprüfen der erreichten Positionsgenauigkeit der Georeferenzierung, und diese unter Umständen signalisiert werden müssen, erhöht sich der Aufwand hierbei beträchtlich.
- Der Aufwand zur Objektextraktion ist abhängig von der Anzahl und der Komplexität der zu extrahierenden Objekte. Zum Erstellen einer Flughafendatenbank für einen Flughafen mittlerer Größe müssen ca. 2.000 Elemente, bestehend aus ca. 15.000 Einzelpunkten extrahiert werden. Nach einer Abschätzung von M.F. Goodchild [Bil1997] kann ein Operator eine mittlere Anzahl von 60 Elemente pro Stunde aus einer Karte extrahieren. Eigene Erfahrungswerte lassen diese Anzahl jedoch als zu konservativ erscheinen; im folgenden wird mit 90 Elementen pro Stunde gerechnet.

- Der zeitliche Umfang zur Qualitätsüberprüfung und Korrektur von Fehlern ist abhängig von der Genauigkeit und Sorgfalt des Operators

Arbeitsschritt		Geschätzter Aufwand flugzeug-gestützte Sensoren	Geschätzter Aufwand satelliten-gestützte Sensoren
Planung und Durchführung des Bildfluges		16h	
Prozessieren des Bildmaterials		1h	
Georeferenzierung	Direkt	2h	
	Indirekt (incl. Einmessung von GCPs)	18h	18h
Objektextraktion		22h	22
Qualitätsüberprüfung und notwendige Korrekturen		7.2h	7.2
Summe	Direkte Georeferenzierung	48.2h (6 Manntage)	29.2 h (4 Manntage)
	Indirekte Georeferenzierung	64.2h (8 Manntage)	47.2 h (6 Manntage)

Tabelle 42: Geschätzter Aufwand zum Erstellung von Flughafendatenbankobjekten aus Aufzeichnungen elektro-optischer Sensoren

Der Gesamtaufwand läge nach dieser Abschätzung für flugzeuggestützte Sensoren bei 48.2h (6 Manntagen) bei direkter Georeferenzierung und bei 64.2h (8 Manntagen) bei indirekter Georeferenzierung. Bei satellitengestützten Sensoren liegt der Gesamtaufwand bei 29.2h (4 Manntagen) bei direkter Georeferenzierung und bei 47.2. (6 Manntagen) bei indirekter Georeferenzierung. Zusätzlich müssen zu den reinen Arbeitsaufwänden die Kosten zur Nutzung des Fluggerätes bzw. die Kosten zum Erwerb der Satellitenbildszene berücksichtigt werden.

Die Verteilung der zeitlichen Anteile der Einzelprozesse am Gesamtprozess zeigt, dass bei flugzeuggestützten Sensoren der Aufwand zur Erstellung und Aufbereitung der Fernerkundungsbildbasis nahezu gleichhoch ist wie der Aufwand zur Objektextraktion. Dem hingegen liegt der Aufwandsschwerpunkt bei der Nutzung satellitengestützter Sensoren bei der Extraktion der Flughafendatenbankobjekte.

### **8.6.3 SAR**

#### **8.6.3.1 Verfügbarkeit**

##### **Lokale Verfügbarkeit**

Auch bei SAR-Fernerkundungssensoren muss zwischen flugzeuggestützten und satellitengestützten Sensoren unterschieden werden. Insbesondere wegen der hohen Systemkosten von SAR-Systemen kann nicht davon ausgegangen werden, dass flugzeuggestützte Systeme weltweit lokal oder regional verfügbar sind. Sie können jedoch mittels der Sensorplattform Flugzeug an fast jeden beliebigen Ort weltweit transportiert und dort eingesetzt werden.

Aufzeichnungen satellitengestützter SAR- Fernerkundungssensoren sind weltweit verfügbar. Ebenso wie bei satellitengestützten elektro-optischen Sensoren befinden sich SAR-Satelliten zur räumlichen Abdeckung der gesamten Erdoberfläche in der Regel auf kreisförmigen Umlaufbahnen. Da die Satellitenbahn ihre Lage im Raum beibehält, aber die Erdoberfläche unter dieser Bahn aufgrund der Rotation der Erdkugel hindurchwandert, sind die Bodenspuren der aufeinander folgenden Satellitenumläufe etwas gegeneinander versetzt. Die Bahnparameter sind so gewählt, dass nach und nach die ganze Erdoberfläche aufgenommen werden kann und sich der Vorgang nach einer festen Anzahl von Tagen wiederholt (Wiederkehr) bzw. dass eine optimale Periodizität für ein ausgewähltes Gebiet möglich ist.

##### **Allgemeine und verfahrensspezifische Einschränkungen**

Keine. Aufgrund der aktiven Ausstrahlung von Mikrowellen sind SAR-Sensoren unabhängig von der Sonne als Lichtquelle - es kann auch bei Dunkelheit aufgezeichnet werden.

##### **Wetterabhängigkeit**

SAR-Sensoren sind weitgehend unabhängig von Wetter. Die Frequenz der aktiv gesendeten Mikrowellenstrahlung ist so gewählt, dass keine Interferenz mit zwischen dem Satelliten oder Flugzeug und der Erdoberfläche befindlichen Wolken oder leichtem Regen auftritt. Lediglich starke Regenfälle beeinträchtigen die Aufzeichnung [Cam1996].

#### **8.6.3.2 Aufwandsabschätzung**

Ebenso wie bei elektro-optischen Fernerkundungssensoren müssen bei SAR die zwei Fälle flugzeuggestützter und satellitengestützter Sensoren unterschieden werden.

Der Gesamtaufwand setzt sich aus folgenden Komponenten zusammen:

- Planung und Durchführung der Befliegung bzw. Kosten des Erwerbs von SAR-Satellitenbildszenen
- Georeferenzierung
- Objektextraktion
- Qualitätsüberprüfung der extrahierten Objekte und Korrektur von Fehlern

Die folgenden Angaben sind Abschätzungen und basieren auf Industrieangaben zu Kosten von Satellitenbildszenen, Bildprozessierung und Georeferenzierung sowie auf verschiedenen

Untersuchungen zur Datenerhebung für Autonavigationssystemen auf der Grundlage von Papierkarten [Bil1997] und eigenen Erfahrungswerten zur Erstellung von Flughafendatenbanken basierend auf chemo-optisch und elektro-optisch akquiriertem Bildmaterial.

- Der Aufwand und die Kosten zur Planung und Durchführung einer SAR-Befliegung kann nur grob abgeschätzt werden, da keine Referenzinformation vorlag. Die Kosten sind abhängig von Rahmenparametern wie Größe des zu befliegenden Gebietes und zu erzielende räumliche Auflösung. Sie werden wegen der geringen Anzahl verfügbarer flugzeuggestützter Sensoren und den dadurch anfallenden Bereitstellungskosten höher als die Kosten für chemo-optische bzw. elektro-optische Bildflüge eingeschätzt. Die Kosten zum Erwerb von SAR- Satellitenbildszenen liegen im Bereich von ca. 1.000-2.000 EUR, je nach Prozessierungslevel und Art der Georeferenzierung (direkt oder indirekt).
- Werden die SAR-Szenen zur direkten Georeferenzierung ohne GCPs mittels Aufzeichnungen von differenziellem GPS und hochgenauer Inertialsysteme im Raum orientiert, reduziert sich der Flugaufwand und die Arbeit im Gelände, da der Arbeitsablauf weitgehend automatisiert ist. Da zur indirekten Georeferenzierung 4 oder mehr GCPs benötigt werden, die in den Ecken und Rändern des Blockes verteilt sind, sowie zusätzliche Checkpunkte zum Überprüfen der erreichten Positionsgenauigkeit der Georeferenzierung, und diese unter Umständen signalisiert werden müssen, erhöht sich der Aufwand hierbei beträchtlich.
- Der Aufwand zur Objektextraktion ist abhängig von der Anzahl und der Komplexität der zu extrahierenden Objekte. Zum Erstellen einer Flughafendatenbank für einen Flughafen mittlerer Größe müssen ca. 2.000 Elemente, bestehend aus ca. 15.000 Einzelpunkten extrahiert werden. Nach einer Abschätzung von M.F. Goodchild [Bil1997] kann ein Operator eine mittlere Anzahl von 60 Elemente pro Stunde aus einer Karte extrahieren. Eigene Erfahrungswerte lassen diese Anzahl jedoch als zu konservativ erscheinen; im folgenden wird mit 90 Elementen pro Stunde gerechnet.
- Der zeitliche Umfang zur Qualitätsüberprüfung und Korrektur von Fehlern ist abhängig von der Genauigkeit und Sorgfalt des Operators

Arbeitsschritt		Geschätzter Aufwand flugzeug-gestützte Sensoren	Geschätzter Aufwand satelliten-gestützte Sensoren
<b>Planung und Durchführung des Bildfluges sowie Prozessierung der Aufnahmen</b>		20h	
<b>Georeferenzierung</b>	<i>Direkt</i>	2h	
	<i>Indirekt (incl. Einmessung von GCPs)</i>	18h	18h
<b>Objektextraktion</b>		22h	22
<b>Qualitätsüberprüfung und notwendige Korrekturen</b>		7.2h	7.2
<b>Summe</b>	<i>Direkte Georeferenzierung</i>	51.2h (6 Manntage)	29.2 h (4 Manntage)
	<i>Indirekte Georeferenzierung</i>	67.2h (10 Manntage)	47.2 h (6 Manntage)

Tabelle 43: Geschätzter Aufwand zum Erstellung von Flughafendatenbankobjekten aus SAR-Intensitätsaufzeichnungen

Der Gesamtaufwand läge nach dieser Abschätzung für flugzeuggestützte Sensoren bei 51.2h (6 Manntagen) bei direkter Georeferenzierung und bei 67.2h (10 Manntagen) bei indirekter Georeferenzierung. Bei satellitengestützten Sensoren liegt der Gesamtaufwand bei 29.2h (4 Manntagen) bei direkter Georeferenzierung und bei 47.2. (6 Manntagen) bei indirekter Georeferenzierung. Zusätzlich müssen zu den reinen Arbeitsaufwänden die Kosten zur Nutzung des Fluggerätes bzw. die Kosten zum Erwerb der Satellitenbildszene berücksichtigt werden.

Auch hier zeigt die Verteilung der zeitlichen Anteile der Einzelprozesse am Gesamtprozess, dass bei flugzeuggestützten Sensoren ein beträchtlicher Aufwand in die Erstellung und Aufbereitung der Fernerkundungsbildbasis investiert werden muss. Dem hingegen liegt der Schwerpunkt bei der Nutzung satellitengestützter Sensoren bei der Extraktion der Flughafendatenbankobjekte.

## **8.6.4 LIDAR**

### **8.6.4.1 Verfügbarkeit**

#### **Lokale Verfügbarkeit**

Existierende LIDAR-Fernerkundungssensoren werden lediglich mittels Flugzeugen als Sensorplattform betrieben. Die weltweite Verbreitung von flugzeuggestützten LIDAR hat in den letzten Jahren stark zugenommen, so dass zwar nicht von lokaler, aber zumindest von regionaler Verfügbarkeit ausgegangen werden kann. Ebenso wie alle anderen flugzeuggestützten Sensorsysteme können sie jedoch bei Bedarf an fast jeden beliebigen Ort weltweit transportiert und dort eingesetzt werden.

#### **Allgemeine und verfahrensspezifische Einschränkungen**

Aufgrund der aktiven Ausstrahlung von Mikrowellen sind LIDAR-Sensoren ebenso wie SAR-Sensoren unabhängig von der Sonne als Lichtquelle - es kann auch bei Dunkelheit aufgezeichnet werden. Die meisten verfügbaren LIDAR sind jedoch Einsätze unter Tageslichtkonditionen ausgelegt.

Die Reflektion starker Sonneneinstrahlung durch ein hochreflektives Zielobjekt kann zu einer Übersättigung des LIDAR-Sensoren und damit zu weniger genauen Aufzeichnungen führen [Opt2005].

#### **Wetterabhängigkeit**

Durch Interaktion mit Dunst und hoher Luftfeuchtigkeit (Nebel, Wolken) kann der ausgehende Laserstrahl sowie das reflektierte Signal geschwächt und gestreut werden. Durch Last-Pulse LIDAR-Messungen können diese Probleme reduziert werden. LIDAR-Systeme, welche regelmässig in dunstigen Gebieten oder Gebieten mit hoher Luftfeuchtigkeit operieren, können entsprechend angepasst werden [Opt2005]. Aufzeichnungen im Regen sind nicht möglich.

### **8.6.4.2 Aufwandsabschätzung**

Der Gesamtaufwand zum Erzeugen von Flughafendatenbanken basierend auf LIDAR-Intensitätsaufzeichnungen setzt sich aus folgenden Komponenten zusammen:



- Planung und Durchführung der LIDAR-Befliegung
- Datenprozessierung und direkte Georeferenzierung
- Objektextraktion
- Qualitätsüberprüfung der extrahierten Objekte und Korrektur von Fehlern

Die folgenden Angaben sind Abschätzungen und basieren auf verschiedenen Untersuchungen zur Datenerhebung für Autonavigationssystemen auf der Grundlage von Papierkarten [Bil1997] und eigenen Erfahrungswerten zur Erstellung von Flughafendatenbanken basierend auf chemo-optisch und elektro-optisch akquiriertem Bildmaterial.

- Der Aufwand und die Kosten zur Planung und Durchführung einer LIDAR-Befliegung kann nur grob abgeschätzt werden, da keine Referenzinformation vorlag. Ebenso wie bei Befliegungen durch chemo- und elektro-optische sowie SAR Sensoren sind die Kosten einer LIDAR-Befliegung abhängig von Rahmenparametern wie Größe des zu befliegenden Gebietes und der zu erzielenden räumliche Auflösung. Wegen der relativ hohen Durchdringung des Marktes mit flugzeuggestützten LIDAR werden die Kosten einer Befliegung in etwa gleichhoch wie die Kosten für chemo-optische Bildflüge eingeschätzt.
- Der Aufwand zur Datenprozessierung und direkten Georeferenzierung wird wegen dem hohen Automatisierungsgrad als relativ gering angesehen.
- Der Aufwand zur Objektextraktion ist abhängig von der Anzahl und der Komplexität der zu extrahierenden Objekte. Zum Erstellen einer Flughafendatenbank für einen Flughafen mittlerer Größe müssen ca. 2.000 Elemente, bestehend aus ca. 15.000 Einzelpunkten extrahiert werden. Nach einer Abschätzung von M.F. Goodchild [Bil1997] kann ein Operator eine mittlere Anzahl von 60 Elemente pro Stunde aus einer Karte extrahieren. Eigene Erfahrungswerte lassen diese Anzahl jedoch als zu konservativ erscheinen; im folgenden wird mit 90 Elementen pro Stunde gerechnet.
- Der zeitliche Umfang zur Qualitätsüberprüfung und Korrektur von Fehlern ist abhängig von der Genauigkeit und Sorgfalt des Operators

Arbeitsschritt	Geschätzter Aufwand flugzeug-gestützte Sensoren
<b>Planung und Durchführung der LIDAR-Befliegung</b>	10h
<b>Datenprozessierung und direkte Georeferenzierung</b>	3h
<b>Objektextraktion</b>	22h
<b>Qualitätsüberprüfung und notwendige Korrekturen</b>	7.2h
<b>Summe</b>	42.2h (5 Manntage)

Tabelle 44: Geschätzter Aufwand zum Erstellung von Flughafendatenbankobjekten aus LIDAR-Intensitätsaufzeichnungen

Der Gesamtaufwand läge nach dieser Abschätzung für bei 42.2h (5 Manntagen). Zusätzlich müssen zu den reinen Arbeitsaufwänden die Kosten zur Nutzung des Fluggerätes bzw. die Kosten zum Erwerb der Satellitenbildszene berücksichtigt werden.

### 8.6.5 Zusammenfassung und Beurteilung der Ergebnisse

Die Verfügbarkeit der verschiedenen untersuchten Sensorsysteme kann unterschieden werden in eine räumliche Komponente (Lokale Verfügbarkeit: Wo ist der Sensor verfügbar?) und eine zeitliche Komponente (wann ist der Sensor nutzbar?).

Die räumliche Komponente ist abhängig von der genutzten Sensorplattform (Flugzeug, Satellit). Bei Flugzeugen als Sensorplattform ist die lokale Verfügbarkeit abhängig von der Marktdurchdringung des Sensors. Neuere und teure Sensortechnologien (elektro-optisch, SAR) sind weniger verfügbar als ältere und günstigere Sensortechnologien (chemo-optische Sensoren, LIDAR). Die zeitliche Verfügbarkeit ist abhängig davon, ob die Systeme mit eigener Strahlungsquelle arbeiten (aktive Sensoren) oder Sonnenlicht als Strahlungsquelle nutzen (passive Sensoren) sowie von der spektralen Auflösung des Sensors. Während aktive Sensoren (SAR, LIDAR) weitgehend unabhängig von Beleuchtung und Wettereinflüssen eingesetzt werden können, da sie eine eigene Strahlungsquelle besitzen und im nahen Infrarotbereich bzw. Mikrowellenbereich aufzeichnen, besitzen passive Sensoren (chemo-optische und elektro-optische Sensoren) tageszeitliche und jahreszeitliche sowie wetterspezifische Einschränkungen, da sie vom Sonnenlicht als Strahlungsquelle abhängig sind und sichtbares Licht z.B. durch Wolken absorbiert wird.

Tabelle 45 zeigt die räumliche und zeitliche Verfügbarkeit der untersuchten Fernerkundungs-sensorsysteme im Vergleich.

Verfahren	Sensor-plattform	Räumliche Verfügbarkeit	Zeitliche Verfügbarkeit
<b>Chemo-optisch</b>	Flugzeug	In Industrieländern lokal und in Entwicklungsländern zumindest regional verfügbar. Sensor kann bei Bedarf mittels der Sensorplattform Flugzeug an fast jeden beliebigen Ort weltweit transportiert werden.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tageszeitliche Einschränkung durch Beleuchtungsanforderungen</li> <li>- Jahreszeitliche Einschränkungen wegen Schnee- oder Eisbedeckung</li> </ul>
<b>Elektro-optisch</b>	Flugzeug	Regional verfügbar; Sensor kann bei Bedarf mittels der Sensorplattform Flugzeug an fast jeden beliebigen Ort weltweit transportiert werden.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tageszeitliche Einschränkung durch Beleuchtungsanforderungen</li> <li>- Jahreszeitliche Einschränkungen wegen Schnee- oder Eisbedeckung</li> </ul>
	Satellit	Weltweit Einschränkungen der lokalen Verfügbarkeit durch dauerhafte lokale Wolkenbedeckung	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Keine Tageszeitliche Einschränkung wegen sonnensynchroner Umlaufbahn.</li> <li>- Jahreszeitliche Einschränkungen wegen Schnee- oder Eisbedeckung</li> </ul>
<b>SAR</b>	Flugzeug	Es kann weder von lokaler noch regionaler Verfügbarkeit ausgegangen werden. Sensor kann mittels der Sensorplattform Flugzeug an fast jeden beliebigen Ort weltweit transportiert werden.	Keine Aufzeichnungen bei starkem Regen möglich, ansonsten wetter-, jahreszeit- und tageszeitunabhängig.
	Satellit	Weltweit	

Verfahren	Sensor-plattform	Räumliche Verfügbarkeit	Zeitliche Verfügbarkeit
<b>LIDAR</b>	Flugzeug	Regional verfügbar; Sensor kann bei Bedarf .mittels der Sensorplattform Flugzeug an fast jeden beliebigen Ort weltweit transportiert werden	Keine Aufzeichnungen bei Regen möglich, ansonsten wetter-, jahreszeit- und tageszeitunabhängig.

Tabelle 45: Übersicht der räumlichen und zeitlichen Verfügbarkeit der untersuchten Fernerkundungssensorsysteme

Satellitengestützte SAR-Systeme bieten demnach die beste räumliche und zeitliche Verfügbarkeit, flugzeuggestützte elektro-optische Systeme die schlechteste.

Der benötigte Aufwand zum Erstellen von Flughafendatenbankobjekten mittels verschiedenen Verfahren der Fernerkundung ist abhängig von der Art der Georeferenzierung (direkt oder indirekt). Bei indirekter Georeferenzierung müssen zum Erreichen der benötigten Positionsgenauigkeit GCPs eingemessen werden, was den Aufwand deutlich erhöht. Im Allgemeinen ist die Bildprozessierung bei Systemen mit direkter Georeferenzierung weitaus automatisierter, was den Aufwand senkt.

Die Kosten zur Beschaffung der Fernerkundungsaufzeichnung sind bei flugzeuggestützten Systemen deutlich höher (geschätzter. Faktor 3-10) als bei satellitengestützten Systemen, welche sich permanent im Orbit befinden. Die Kosten zur Beschaffung der Fernerkundungsaufzeichnung bei flugzeuggestützten Systemen sind im Mittel für solche Systeme höher, welche nur regional verfügbar sind, da hier noch Überführungsflüge zu den Kosten hinzukommen:

Verfahren	Sensorplattform	Georeferen-zierung	Aufwand (Manntage)	Kosten zur Beschaffung der Fernerkundungsaufzeichnung (Bildflug, ect.)
<b>Chemo-optisch</b>	Flugzeug	Direkt	6	Hoch
		Indirekt	9	Hoch
<b>Elektro-optisch</b>	Flugzeug	Direkt	6	Sehr Hoch
		Indirekt	8	Sehr Hoch
	Satellit	Direkt	4	Gering
		Indirekt	6	Gering
<b>SAR</b>	Flugzeug	Direkt	6	Sehr Hoch
		Indirekt	10	Sehr Hoch
	Satellit	Direkt	4	Gering
		Indirekt	6	Gering
<b>LIDAR</b>	Flugzeug	Direkt	5	Hoch

Tabelle 46: Vergleich von Aufwand und Kosten zum Aufwand zum Erstellen von Flughafendatenbankobjekten mittels verschiedenen Verfahren der Fernerkundung

Die geringste Kosten-/Aufwandskombination bietet die Erstellung von Flughafendatenbankobjekten mittels satellitengestützter SAR- und elektro-optischer Sensoren.



## **8.7 Zusammenfassung und Beurteilung der Ergebnisse: Erzeugen von Flughafendatenbanken mittels Methoden der Fernerkundung**

### **Untersuchte Sensorsysteme**

Im Rahmen der Untersuchung zur Nutzung von Methoden der Fernerkundung zum Erzeugen von Flughafendatenbanken nach RTCA Do-272a, Kategorie Medium, wurden die Datenprodukte folgender Fernerkundungssysteme auf Erfüllen der Anforderungen bzgl. Vollständigkeit und Positionsgenauigkeit untersucht:

- Chemo-optische Sensoren
- Elektro-optische Sensoren
- Synthetic Aperture Radar (SAR)-Sensoren
- Light Intensity and Range (LIDAR)-Sensoren

Im Rahmen der Evaluierung wurden gegenwärtig verfügbare Fernerkundungssysteme untersucht. Die zur Evaluierung ausgewählten Sensorsysteme decken für das jeweilige Fernerkundungsverfahren das obere Leistungsspektrum ab.

Die zu der Klasse der passiven Sensoren gehörenden chemo-optischen Sensoren zeichnen die spektrale Variation der von der Erdoberfläche reflektierten Sonnenstrahlung auf einem chemischen Bildträger, dem Luftbildfilm auf, dessen photosensitive Halogensilberkristalle auf Lichteinfluss reagieren. Als Sensorplattform dienen nahezu ausschliesslich Flugzeuge; die wenigen satellitengestützten Systeme besitzen heute keine Bedeutung mehr. Mittels chemo-optischen Sensoren können als Primärdatenprodukte sowohl Farb- als auch panchromatische (Graustufen-) Luftbilder aufgenommen werden, in denen Objekte der Erdoberfläche ähnlich oder gleich der Wahrnehmung des menschlichen Auges abgebildet sind. Aus den Luftbildern können Stereomodelle, Orthophotos und Höhenmodelle abgeleitet werden können. Als Grundlage zur Extraktion von Flughafendatenbankobjekten dienen Stereomodelle und Orthophotos.

Die zur Klasse der passiven Fernerkundungssensoren gehörenden elektro-optischen Sensoren zeichnen die spektrale, räumliche und radiometrische Variation der von der Erdoberfläche reflektierten und emittierten Strahlung durch linienhaft angeordnete Charged-Coupled-Devices (CCDs), Ladungsträger auf Silikonbasis, auf. Durch die zeilenhafte Anordnung der CCDs (daher auch der Name „Zeilenscanner“) unterscheidet sich die Bildgeometrie wesentlich von der Zentralperspektive von chemo-optischen Sensoren. Es kann eine hohe Signalintensität (Sensitivität) erreicht werden, wodurch spektrale und radiometrische Änderungen linear auch noch bei ungünstigen Lichtverhältnissen aufgezeichnet werden. Als Sensorplattform dienen sowohl Flugzeuge als auch Satelliten. Primärdatenprodukte elektro-optischer Fernerkundungssysteme sind so genannte Szenen. Je nach Spektralbereich des Sensors werden Objekte der Erdoberfläche im sichtbaren Spektralbereich aufgenommen, wobei die Darstellung in der Szene der des menschlichen Auges entspricht, oder im nahen oder fernen Infrarot, wo sich die Darstellung von Objekten stark unterscheidet. Basierend auf dem Primärdatenprodukt können geometrisch korrigierte Szenen, Orthoszenen, Stereodaten und Geländemodelle abgeleitet werden können. Als Grundlage zur Extraktion von Flughafendatenbankobjekten dienen geometrisch korrigierte Szenen, Stereomodelle und Orthophotos.

Synthetic Apertur Radar (SAR) gehört zur Gruppe der aktiven Fernerkundungssensoren, welche nicht die Reflektionen der Sonneneinstrahlung durch den Erdboden aufzeichnen, sondern eine eigene Strahlungsquelle besitzen. Damit unterscheidet es sich grundlegend

von den passiven chemo- und elektro-optischen Fernerkundungssensoren. Die Radarstrahlung gehört zur Mikrowellenstrahlung und erlaubt Aufzeichnungen der Reflektion unabhängig von Wetter und Tageszeit, da sie, abhängig von ihrer Wellenlänge, Wolken, Dunst, Rauch und Schnee durchdringt. Um in Flugrichtung eine höhere Auflösung zu erreichen und insbesondere die Aufnahme von Radarbildern auch von Satelliten aus möglich zu machen, werden Radar-Systeme mit synthetischer Blende (Synthetic-Aperture-Radar oder SAR) eingesetzt. Diese Systeme nutzen nur eine kurze Antenne, welche die Mikrowellenimpulse in einem definierten räumlichen Abstrahlwinkel abstrahlt. Während des Fluges werden einzelne Oberflächenpunkte wiederholt bestrahlt. Dementsprechend tragen sie mehrfach zu den empfangenen Reflexionssignalen bei, welche dadurch miteinander korreliert werden können. Bei der Verarbeitung können die Daten so behandelt werden, als würden sie von einzelnen Elementen eines sehr langen Antennenarmes stammen. Dadurch lassen sich Bilddaten mit hoher geometrischer Auflösung ableiten. Als Sensorplattform dienen sowohl Flugzeuge als auch Satelliten. Primärdatenprodukte von SAR-Fernerkundungssensoren sind Reflektionsintensitätsaufzeichnungen und Phaseninterferogramme. Da SAR als aktiver Fernerkundungssensor keine Reflektion des sichtbaren Lichtes aufzeichnet, sondern im Mikrowellenbereich arbeitet, unterscheidet sich die Darstellung von Objekten in Reflektionsintensitätsaufzeichnungen und Phaseninterferogrammen stark von der natürlichen Darstellung, wobei in Phaseninterferogrammen keine Objektidentifizierung möglich ist. Als Grundlage zur Extraktion von Flughafendatenbankobjekten können daher lediglich Radarintensitätsbilder genutzt werden.

Beim LIDAR-Verfahren wird die Erdoberfläche mit Hilfe eines Laserstrahls abgetastet. Aus der Laufzeit des Impulses vom Aussenden bis zum Empfang der Reflektion desselben wird die Entfernung zwischen dem Laserscanner und der Geländeoberfläche, an der das Signal reflektiert wurde, berechnet. Aus der Laufzeit lässt sich die Entfernung zum Sensor berechnen, ähnlich eines Phaseninterferogramms eines Radarsensors. Zusätzlich zur Laufzeit kann für jedes Signal die Reflektionsintensität aufgezeichnet werden, ähnlich dem eines Radarintensitätsbildes. Die gemessenen Reflektionsintensität ist abhängig von den Reflektionscharakteristika des Objekts in Bezug auf die genutzte Wellenlänge des Lasers. Jede einzelne Intensitätsmessung wird als Grauwert dargestellt. Mit Hilfe der Flugpfadinformation (Position und Lage des LIDAR-Systems im Raum zum Aufnahmezeitpunkt) und der dazugehörenden Entfernungsmessung wird die Lage im Raum für jede einzelne Intensitätsmessung berechnet. Um aus den diskret und unregelmäßig verteilten Reflektionspunkten ein Bild zu erhalten, werden dies in ein regelmäßiges Raster transformiert. Für LIDAR werden in der Regel Flugzeuge als Trägerplattform genutzt. Primärdatenprodukte sind Höhenmesspunkte und Reflektionsintensitätsaufzeichnungen. Zur Nutzung zur Extraktion von Flughafendatenbankobjekten können lediglich Aufzeichnungen der Reflektionsintensitäten genutzt werden.

### **Vorgehensweise**

Zur Evaluierung der Nutzbarkeit von Fernerkundungsmethoden zur Erstellung von Flughafendaten unter Wahrung der definierten Vollständigkeit wurden zunächst Anforderungen zur visuellen Extraktion an radiometrische, spektrale und räumliche Auflösung aus der realen Form, Größe und Farbe der Objekte einer Flughafendatenbank abgeleitet. Wichtigste Grundlage zur korrekten visuellen Objekterkennung und -Einmessung ist die Übereinstimmung der zu extrahierenden Objekte in Form und Farbe mit ihrer natürlichen Erscheinung. Weicht die Darstellungen ab, wie z.B. bei aktiven Sensoren (Radar- und LIDAR) der Fall, aber auch bei panchromatischen Darstellungen von passiven Sensoren, muss der Zusammenhang zwischen Darstellung im Bild und in Realität durch den Operator erst erlernt werden.

Folgende Anforderungen an radiometrische, spektrale und räumliche Auflösung wurden abgeleitet:

Merkmal	Anforderung	Ratio
<b>Radiometrische Auflösung</b>	Im Graustufenbild: 2048 Helligkeitsstufen (11bit)  Im Echtfarbenbild: Mind. 4096 Farbstufen (RGB 12 bit)	Ausreichende Unterscheidung von Objekten mit geringen Unterschieden in der spektralen Reflektionscharakteristik
<b>Spektrale Auflösung</b>	Abbildung des sichtbaren Spektralbereichs mit Darstellung als Echtfarbenbild	Identifizierung von Objekten unter Vermeidung von Fehlklassifikationen sowie ausreichende Unterscheidung von Objekten mit geringen Unterschieden in der spektralen Reflektionscharakteristik
<b>Räumliche Auflösung</b>	< 0.6 m	Lokalisierung und Identifizierung von <i>Vertical Point Objects</i> als Flughafendatenbankobjekte mit der geringsten Grundfläche und ohne charakteristische geometrische Ausprägung

Tabelle 47: Auflösungsanforderungen an Fernerkundungssysteme zum Erfüllen der Vollständigkeit von Flughafendatenbanken

Die abgeleiteten Anforderungen bzgl. radiometrischer, spektraler und räumlicher Auflösung wurden mit den Leistungsspektren der untersuchten Fernerkundungssysteme zunächst im Allgemeinen verglichen und die Ergebnisse mittels ausgewählter Testdaten in Falluntersuchungen evaluiert. Abschließend wurden die Produktspezifikationen gängiger Fernerkundungs-Sensorsysteme mit den abgeleiteten Anforderungen verglichen und die Sensoren hinsichtlich des Erfüllens und Nichterfüllens der Anforderungen eingeordnet.

Zur Evaluierung der verschiedenen untersuchten Sensorsysteme hinsichtlich des Erfüllens der Anforderung an Positionsgenauigkeit wurde zunächst aus dem zulässigen horizontalen Positionsfehler von Flughafendatenbank-Vektorobjekten der zulässige horizontale Positionsfehler des Fernerkundungsbildes nach der Georeferenzierung abgeleitet. Hierzu wurde der während der Objektextraktion induzierte Positionsfehler durch angenäherte Extraktion von Kreissegmenten durch Liniensegmente und der induzierte Positionsfehler durch inkorrektes Setzen der Knoten und Vertices basierend auf Erfahrungswerten und Literaturangaben abgeschätzt. Der zulässige horizontale Positionsfehler des Fernerkundungsbildes nach der Georeferenzierung wurde mit 4.95m CE90 bestimmt.

### Ergebnisse bzgl. des Erfüllens der Anforderung an Vollständigkeit

Zwei Faktoren wurden identifiziert, welche als Kriterium des Erfüllens der Anforderung an Vollständigkeit dienen:

- Die Aufnahmehöhe der Sensorplattform beeinflusst wesentlich die räumliche Auflösung
- Der Spektralbereich des Sensorsystems beeinflusst wesentlich die korrekte Objektidentifizierung bei der visuellen Objektextraktion

### **Chemo-optische Fernerkundungssensoren**

Bei chemo-optischen Sensoren ist die räumliche Auflösung abhängig insbesondere von der Flughöhe (bzw. Umlaufbahn bei satellitengestützten Sensoren) und dem optischen

Auflösungsvermögens des Filmes. Für alle untersuchten flugzeuggestützten Sensoren konnte eine erforderliche Auflösung von  $<0.6$  m bei adäquater Wahl des Luftbildfilmes und der Flughöhe erreicht werden.

Die spektrale Auflösung chemo-optischer Sensoren wird durch den Film bestimmt. Die spektrale Auflösung von Luftbild-Farbfilmern entspricht den Anforderungen zur Abbildung des sichtbaren Spektralbereichs in Echtfarben.

Die radiometrische Auflösung wird ebenfalls durch den Film bestimmt, kann im Gegensatz zu elektronischen/digitalen Verfahren jedoch nicht genau bestimmt werden. Sie ist jedoch ausreichend hoch, um auch bei schlechten Beleuchtungssituationen noch Objekte mit ähnlicher spektraler Reflektionscharakteristik voneinander unterscheiden zu können.

Alle untersuchte flugzeuggestützte chemo-optische Sensoren erfüllen somit die Anforderungen an räumliche, spektrale und radiometrische Auflösung bei Auswahl des adequate Luftbildfilms (Farbfilm, hohes optisches Auflösungsvermögen) und der adequate Flughöhe. Lediglich ein satellitengestützter Sensor erfüllt wegen seiner hohen Flughöhe, der hieraus resultierenden geringeren räumlichen Auflösung sowie der geringen spektralen Auflösung wegen Nutzung eines panchromatischen Films die Anforderungen an spektrale und räumliche Anforderungen nicht.

In Kombination mit Aerodrome/Heliport Chart ICAO zum Extrahieren von Objekten mit fiktiver räumlicher Ausprägung kann durch flugzeuggestützte chemo-optische Sensoren die Anforderungen an Vollständigkeit nach RTCA Do-272a gewährleistet werden.

### **Elektro-optische Fernerkundungssensoren**

Bei elektro-optischen Sensoren ist die räumliche Auflösung abhängig von der Flughöhe, der Anzahl an CCD-Elementen pro Zeile und der Brennweite der Optik. Je niedriger die Flughöhe und je größer die Anzahl an CCDs für einen durch die Brennweite der Optik bestimmten *Field of View*, desto höher die räumliche Auflösung. Während die Anzahl an CCD-Elementen pro Zeile sowie die Optik Sensorsystem-spezifisch ist, kann durch Anpassung der Flughöhe die benötigte räumliche Auflösung erreicht werden. Dies gilt allerdings nur für flugzeuggestützte Sensoren; bei satellitengestützten Sensoren sind alle drei Faktoren als Konstanten anzusehen. Daher erfüllen auch nur die flugzeuggestützten elektro-optischen Sensorsysteme sowie zwei höchstauflösende satellitengestützte elektro-optische Sensorsysteme die definierten Anforderungen bezüglich räumlicher Auflösung.

Die definierte Anforderung an die spektrale Auflösung wird durch so genannte Multispektralscanner erfüllt, die den Spektralbereich des sichtbaren Lichtes durch drei Farbkanäle rot, grün und blau abdecken. Durch Kombination der drei Farbkanäle zu einem Echtfarbenbild kann die Anforderung an naturgetreue farbliche Darstellung entsprechend der menschlichen Wahrnehmung erfüllt werden. Dies ist bei allen untersuchten flugzeuggestützten und den meisten satellitengestützten elektro-optischen Sensorsystemen der Fall.

Die meisten opto-elektronischen Zeilenscanner arbeiten mit 8 bit – 11 bit Farbtiefe pro Kanal, unterscheiden also 256 bis 2048 Grauwertstufen. Zur Erstellung eines Echtfarbenbildes des sichtbaren Bereiches werden die Spektralbereiche der Farben blau, grün und rot in getrennten Kanälen mit jeweils 8 bit – 11 bit radiometrischer Auflösung aufgezeichnet und kombiniert. Das resultierende Echtfarbenbild besitzt eine Farbtiefe von  $3 \times 8 - 11$  bit, entsprechend 16.7 Mio. - 8589 Mio. Farben. Die Anforderung an die radiometrische Auflösung werden demnach von Multispektralscannern, welche den Bereich des sichtbaren Lichtes mit drei Einzelkanälen mit jeweils mindestens 8bit radiometrischer Auflösung abdecken, erfüllt.

Alle untersuchten flugzeuggestützten elektro-optischen Sensorsysteme erfüllen die gestellten Anforderungen an räumliche, spektrale und radiometrische Auflösung. Wegen des grossen Abstandes zur Erdoberfläche liefern die meisten satellitengestützten Sensorsysteme nicht



die erforderliche räumliche Auflösung. Die höchstauflösenden satellitengestützten Sensoren GeoEye-1, Worldview-1 als auch Quickbird-2 erreichen die erforderliche räumliche Auflösung, jedoch lediglich für den panchromatischen Kanal (Quickbird-2 hier nur bei einer Nadirabbildung). Durch das *pansharpening*, einer nachträglichen Verbesserung der räumlichen Auflösung eines Echtfarbenbildes durch Kombination des höchstauflösenden panchromatischen Kanals mit den drei niedriger auflösenden Farbkanälen können sowohl GeoEye-1 als auch Quickbird-2 die Anforderung an räumliche als auch an spektrale Auflösung erfüllen. WorldView-1 kann die Anforderungen an spektrale Auflösung nicht erfüllen, da er lediglich über einen panchromatischen Kanal verfügt.

In Kombination mit Aerodrome/Heliport Chart ICAO zum Extrahieren von Objekten mit fiktiver räumlicher Ausprägung können alle flugzeuggestützten elektro-optischen Sensoren sowie der satellitengestützte Sensor Quickbird-2 die Anforderungen an Vollständigkeit nach RTCA Do-272a gewährleisten.

### **SAR-Fernerkundungssensoren**

Die räumliche Auflösung von Radarintensitätsbildern hängt von den Eigenschaften der Mikrowellenstrahlung und den geometrischen Effekten ab. Die Auflösung quer zur Flugrichtung (Range) hängt von der Pulslänge der Mikrowellenfront sowie dem Depressionswinkel ab. Die Auflösung in Flugrichtung (Azimut) hängt von dem räumlichen Abstrahlwinkel in Flugrichtung, der Entfernung zum Aufnahmeobjekt und der Größe der Antenne ab. Gängige Auflösungen von satellitengestützten SAR-Systemen liegen im 10m bis 100m Bereich, der von flugzeuggestützten Systemen im 1.25m – 5 m Bereich. Hiermit erfüllen weder satellitengestützte noch flugzeuggestützte Systeme die Anforderungen bezüglich der räumlichen Auflösung.

Die spektrale Auflösung eines SAR-Sensors beschränkt sich auf einen sehr schmales Frequenzspektrum im Mikrowellenbereich. Im Gegensatz zu passiven Fernerkundungssensoren zeichnen SAR-Sensoren nicht die Variation der spektralen Unterschiede von Objektreflektionen über einen weiten Spektralbereich im Bereich des sichtbaren Lichtes auf, sondern die Intensität der Rückstrahlung in Bezug auf den genutzten Spektralbereich der Radarstrahlung (der Wellenlänge der Radarstrahlung). Das aufgezeichnete Intensitätsbild entspricht daher nicht der natürlichen Wahrnehmung des Menschen und kann daher laut den definierten Anforderungen nicht zur Objektidentifizierung der Flughafenobjekte genutzt werden.

Die radiometrische Auflösung beträgt in den betrachteten Sensorsystemen zwischen 8-16 bit (256 – 65536 Farbstufen). Damit erfüllt nur ein Teil der Sensorsysteme die definierten Anforderungen.

Keines der aufgeführten SAR-Sensorsysteme erfüllt die definierten Anforderungen bezüglich spektraler, räumlicher und radiometrischer Auflösung und kann somit die Anforderungen an Vollständigkeit nach RTCA Do-272a nicht gewährleisten.

### **LIDAR-Fernerkundungssensoren**

Die räumliche Auflösung von LIDAR-Intensitätsbildern hängt quer zur Flugrichtung von der Pulsfrequenz des Lasers, in Flugrichtung von der Fluggeschwindigkeit ab. Sowohl in Flugrichtung als auch quer zur Flugrichtung kann die Punktdichte durch die Flughöhe kontrolliert werden. Lediglich die Pulsfrequenz des Lasers ist sensorsystemspezifisch. Die Flughöhe und Fluggeschwindigkeit sind variabel und können angepasst werden, um die erforderliche räumliche Auflösung zu erzielen. Alle im Rahmen der Untersuchung betrachteten LIDAR-Sensorsysteme erfüllen die definierten Anforderungen an die räumliche Auflösung.

Die radiometrische Auflösung von LIDAR ist sensorsystemspezifisch. Recherchen bei verschiedenen Herstellern von LIDAR-Systemen ergaben eine radiometrische Auflösung von

LIDAR-Intensitätsbildern von 8 bis 12 bit (256 -4096 Farbstufen). Damit erfüllt nur ein Teil der betrachteten Systeme die definierte Anforderung an radiometrische Auflösung.

Ähnlich wie SAR-Radarsensoren senden LIDAR-Sensorsysteme gebündelte Strahlung in einem sehr schmalen Wellenlängenbereich aus. Der Wellenlängenbereich der Strahlung liegt jedoch im UV-, sichtbaren oder im nahen Infrarotbereich. Der LIDAR-Sensor zeichnet die Rückstrahlungsintensität in Bezug auf die genutzte Wellenlänge des Lasers auf. Daher entspricht die Darstellung der Objektreflektionen in LIDAR-Intensitätsbildern nicht der natürlichen Wahrnehmung des Menschen und kann laut den definierten Anforderungen nicht zur Objektidentifizierung der definierten Flughafenobjekte genutzt werden. Keines der aufgeführten LIDAR-Sensorsysteme erfüllt also die definierten Anforderungen bezüglich spektraler, räumlicher und radiometrischer Auflösung und kann somit die Anforderungen an Vollständigkeit nach RTCA Do-272a nicht gewährleisten.

### **Ergebnisse bzgl. des Erfüllens der Anforderung an Positionsgenauigkeit**

#### **Chemo-optische Fernerkundungssensoren**

Zum Bestimmen der Positionsgenauigkeit der Georeferenzierung von chemo-optischen Sensorsystemen wurden wegen geringer Abweichungen der Systemspezifikationen nicht die Systeme und deren Datenprodukte, sondern die verschiedenen Verfahren der Georeferenzierung und die hierdurch erreichbare Positionsgenauigkeit untersucht. Hierbei wurde lediglich der Fall der flugzeuggestützten Luftbildkamera untersucht; die Positionsgenauigkeit der Georeferenzierung von satellitengestützten Kameras wurde nicht untersucht. Das Resultat der Untersuchung zeigt, dass durch alle untersuchten direkten und indirekten Verfahren zur Georeferenzierung von chemo-optischen Sensoren die erforderliche Positionsgenauigkeit erreicht wird.

#### **Elektro-optische Fernerkundungssensoren**

Bei elektro-optischen Sensoren zeigt sich eine ausgeprägte Abhängigkeit der erreichbaren Positionsgenauigkeit nicht nur von der Flughöhe der Sensorplattform und der räumlichen Auflösung des Sensors, sondern auch von dem genutzten Verfahren zur Georeferenzierung (direkte und indirekte Georeferenzierung).

- Die flugzeuggestützten Sensoren (HRSC-1 und ADS-40) konnten die erforderliche Positionsgenauigkeit sowohl durch direkte als auch durch indirekte Georeferenzierung erreichen.
- Von den untersuchten satellitengestützten Sensoren konnten lediglich die Sensoren mit höchster räumlicher Auflösung < 1m (IKONOS II, GeoEye-1, Quickbird-2, WorldView-1, EROS A) die Anforderung an Positionsgenauigkeit erfüllen. Lediglich der höchstauflösende Sensor GeoEye-1 kann durch kostengünstige direkte Georeferenzierung die erforderliche Positionsgenauigkeit erreichen; IKONOS II, Quickbird-2, WorldView-1 und EROS A erreichen die erforderliche Genauigkeit nur durch indirekte Georeferenzierung mittels GCP.
- Unabhängig von der Art der Georeferenzierung konnten alle geringer auflösende elektro-optischen Sensoren (Landsat 7, SPOT 5) die Anforderung an Positionsgenauigkeit nicht erfüllen.

Für einige geringer auflösende Sensoren konnten weder Produktspezifikationen noch wissenschaftliche Publikationen zur horizontalen Positionsgenauigkeit der Georeferenzierung gefunden werden. Es wird jedoch wegen der ähnlichen Fehlerquellen und Methodik der Georeferenzierung davon ausgegangen, dass diese Sensoren ebenfalls nicht die Anforderung an Positionsgenauigkeit erfüllen.

### **SAR-Fernerkundungssensoren**

Die untersuchten SAR Fernerkundungssysteme nutzten ausschliesslich direkte Verfahren zur Georeferenzierung. Lediglich der flugzeuggestützte Sensor (STAR 3i) erfüllte die Anforderung an horizontale Positionsgenauigkeit der Intensitätsaufzeichnung. Alle übrigen untersuchten satellitengestützten Sensorsysteme (Radarsat 1, ERS-1, Envisat) konnten die Anforderung nicht erfüllen.

### **LIDAR-Fernerkundungssensoren:**

Bei allen untersuchten LIDAR-Sensorsystemen handelt es sich um flugzeuggestützte Systeme. Die Positionsgenauigkeit der direkten Georeferenzierung der LIDAR-Intensitätsaufzeichnungen korreliert ebenso wie bei allen anderen untersuchten Sensoren mit der Flughöhe der Sensorplattform. Es werden lediglich direkte Verfahren zur Georeferenzierung genutzt; indirekte Verfahren werden nicht genutzt. Alle untersuchten Sensoren erfüllten die Anforderungen an Positionsgenauigkeit der Georeferenzierung.

### **Verfügbarkeit der Fernerkundungssensorsysteme**

Die Verfügbarkeit der untersuchten Fernerkundungssysteme ist abhängig von

- der genutzten Sensorplattform (Flugzeug, Satellit)
- der Marktdurchdringung des Sensors
- der Nutzung eigener Strahlungsquellen
- der spektralen Auflösung des Sensors

### **Chemo-optische Fernerkundungssensoren:**

Flugzeuggestützte Systeme sind in Industrieländern lokal und in Entwicklungsländern zumindest regional verfügbar. Der Sensor kann bei Bedarf mittels der Sensorplattform Flugzeug an fast jeden beliebigen Ort weltweit transportiert werden. Es existieren tageszeitliche Einschränkungen durch Beleuchtungsanforderungen und jahreszeitliche Einschränkungen wegen Schnee- oder Eisbedeckung.

### **Elektro-optische Fernerkundungssensoren:**

Flugzeuggestützte Systeme sind regional verfügbar; der Sensor kann bei Bedarf mittels der Sensorplattform Flugzeug an fast jeden beliebigen Ort weltweit transportiert werden. Es existieren tageszeitliche Einschränkungen durch Beleuchtungsanforderungen und jahreszeitliche Einschränkungen wegen Schnee- oder Eisbedeckung.

Satellitengestützte Systeme liefern weltweite Abdeckung, in wenigen Gebieten ist die Verfügbarkeit von Aufzeichnungen jedoch wegen dauerhafter Wolkenbedeckung eingeschränkt. Es existieren jahreszeitliche Einschränkungen wegen Schnee- oder Eisbedeckung.

### **SAR- Fernerkundungssensoren:**

Flugzeuggestützte Systeme sind weder lokal noch regional verfügbar; existierende Sensoren können jedoch bei Bedarf mittels der Sensorplattform Flugzeug an fast jeden beliebigen Ort weltweit transportiert werden. Satellitengestützte Systeme liefern weltweite Abdeckung. SAR- Fernerkundungssensoren können wetter-, jahreszeit- und

tageszeitunabhängig aufzeichnen. Lediglich bei starkem Regen sind keine Aufzeichnungen möglich.

#### **LIDAR-Fernerkundungssensoren:**

LIDAR-Fernerkundungssensoren sind regional verfügbar; der Sensor kann bei Bedarf mittels der Sensorplattform Flugzeug an fast jeden beliebigen Ort weltweit transportiert werden. Bei Regen sind keine Aufzeichnungen möglich; ansonsten können LIDAR-Fernerkundungssensoren wetter-, jahreszeit- und tageszeitunabhängig eingesetzt werden.

#### **Kosten und Aufwand der Nutzung der Sensorsysteme zum Erstellen von Flughafendatenbanken nach RTCA Do-272a, Kategorie Medium**

Der benötigte Aufwand zum Erstellen von Flughafendatenbankobjekten mittels verschiedener Verfahren der Fernerkundung ist abhängig von der Art der Georeferenzierung (direkt oder indirekt). Bei indirekter Georeferenzierung müssen zum Erreichen der benötigten Positionsgenauigkeit GCPs eingemessen werden, was den Aufwand deutlich steigert. Im Allgemeinen ist die Bildprozessierung bei Systemen mit direkter Georeferenzierung weitaus automatisierter, was den Aufwand senkt.

Die Kosten zur Beschaffung der Fernerkundungsaufzeichnung sind bei flugzeuggestützten Systemen deutlich höher (geschätzter Faktor 3-10) als bei satellitengestützten Systemen, welche sich permanent im Orbit befinden. Die Kosten zur Beschaffung der Fernerkundungsaufzeichnung bei flugzeuggestützten Systemen sind im Mittel für solche Systeme höher, welche nur regional verfügbar sind, da die Kosten durch notwendige Überflüge steigen.

#### **Zusammenfassender Überblick**

Tabelle 48 zeigt die Vor- und Nachteile der Nutzung der verschiedenen untersuchten Fernerkundungssysteme zum Erstellen der Vektorobjekte von Flughafendatenbanken nach RTCA Do-272a, Kategorie Medium:

Verfahren	Vorteile	Nachteile
<b>Fernerkundung generell</b>	<u>Vollständigkeit:</u> Durch Abbilden des gesamten Flughafens auf einer oder mehrerer Szenen kann Vollständigkeit bei der Objektextraktion besser gewährleistet werden  <u>Verfügbarkeit:</u> Keine Wechselwirkung der Vermessungsaktivität mit operativen Abläufen auf dem Flughafen	<u>Verfügbarkeit:</u> Jahres- und tageszeitliche Einschränkungen sowie Einschränkungen durch Wetter möglich (je nach Sensortechnologie (aktiver/passiver Sensor) und spektraler Auflösung)

8.7 Zusammenfassung und Beurteilung der Ergebnisse: Erzeugen von Flughafendatenbanken mittels Methoden der Fernerkundung

Verfahren	Vorteile	Nachteile
<b>Chemo-optische Sensorsysteme (nur flugzeuggestützte Sensoren)</b>	<p><u>Vollständigkeit:</u> Anforderungen an Vollständigkeit erfüllt wegen - hoher räumlicher Auflösung - spektraler Auflösung im sichtbaren Bereich und Echtfarbendarstellung</p> <p><u>Positionsgenauigkeit</u> Anforderungen an Positionsgenauigkeit erfüllt sowohl für direkte als auch indirekte Georeferenzierung</p> <p><u>Verfügbarkeit:</u> Lokale Verfügbarkeit wegen großer Marktdurchdringung</p>	<p><u>Kosten:</u> Da Bildflug durchgeführt werden muss, fallen hohe Kosten zur Beschaffung der Fernerkundungsaufzeichnung an.</p>
<b>Elektro-optische Sensorsysteme</b>	<p><u>Vollständigkeit:</u> - Flugzeuggestützte Systeme und höchstauflösende satellitengestützte Systeme erfüllen Anforderungen an Vollständigkeit - spektrale Auflösung im sichtbaren Bereich und Echtfarbendarstellung</p> <p><u>Positionsgenauigkeit</u> Anforderungen an Positionsgenauigkeit erfüllt für flugzeuggestützte Systeme und höchstauflösende satellitengestützte Sensoren</p> <p><u>Verfügbarkeit:</u> Satellitengestützte Systeme liefern weltweite Abdeckung</p> <p><u>Kosten:</u> Für satellitengestützte Systeme geringe Kosten zur Beschaffung der Fernerkundungsaufzeichnung</p>	<p><u>Kosten:</u> Für flugzeuggestützte Systeme sehr hohe Kosten zur Beschaffung der Fernerkundungsaufzeichnung</p> <p><u>Verfügbarkeit:</u> Flugzeuggestützte Systeme nur regional verfügbar</p>
<b>SAR-Sensor-systeme</b>	<p><u>Verfügbarkeit:</u> Keine Beeinflussung durch Wetter, nicht tages- bzw. jahreszeitabhängig</p> <p>Satellitengestützte Systeme liefern weltweite Abdeckung</p>	<p><u>Vollständigkeit:</u> Nicht zu gewährleisten wegen spektraler Auflösung außerhalb des Bereiches des sichtbaren Lichtes; keine Echtfarbendarstellung möglich</p> <p><u>Positionsgenauigkeit</u> Lediglich flugzeuggestützte Systeme erfüllen Anforderungen</p> <p><u>Verfügbarkeit:</u> Nur regional verfügbar</p> <p><u>Kosten:</u> Da Bildflug durchgeführt werden muss, fallen sehr hohe Kosten zur Beschaffung der Fernerkundungsaufzeichnung an</p>

8.7 Zusammenfassung und Beurteilung der Ergebnisse: Erzeugen von Flughafendatenbanken mittels Methoden der Fernerkundung

Verfahren	Vorteile	Nachteile
<b>LIDAR-Sensorsysteme</b>	<u>Positionsgenauigkeit</u> Anforderungen an Positionsgenauigkeit erfüllt  <u>Verfügbarkeit:</u> Keine Beeinflussung durch Wetter, nicht tages- bzw. jahreszeitabhängig	<u>Vollständigkeit:</u> Nicht zu gewährleisten wegen spektraler Auflösung außerhalb des Bereiches des sichtbaren Lichtes; keine Echtfarbdarstellung möglich  <u>Verfügbarkeit:</u> Nur regional verfügbar  <u>Kosten:</u> Da Bildflug durchgeführt werden muss, fallen hohe Kosten zur Beschaffung der Fernerkundungsaufzeichnung an

Tabelle 48: Vor- und Nachteile der Nutzung der verschiedenen untersuchten Methoden der Fernerkundung zum Erstellen der Vektorobjekte von Flughafendatenbanken nach RTCA Do-272a

In Bezug auf den individuellen Fernerkundungssensor ergibt sich bzgl. des Erfüllens der Anforderung an Vollständigkeit und horizontaler Positionsgenauigkeit folgendes Bild:

Sensor	System	Plattform	Vollständig-keit	Positions-genauigkeit	Sensor nutzbar zum Generieren von Flughafendatenbanken nach RTCA do-272a Kategorie Medium
<b>Chemo-optisch</b>	<b>Leica</b> RC-20, -30	Flugzeug	<b>Erfüllt</b>	<b>Erfüllt</b>	<b>JA</b>
	<b>Carl Zeiss</b> LMK 1015, 15/23 RMK 1TOP, 15/23	Flugzeug	<b>Erfüllt</b>	<b>Erfüllt</b>	<b>JA</b>
	<b>KVR 1000</b>	Satellit	<b>Nicht Erfüllt</b>	<b>Nicht untersucht</b>	<b>NEIN</b>
<b>Elektro-optisch</b>	<b>DLR</b> <b>HRSC-A</b>	Flugzeug	<b>Erfüllt</b>	<b>Erfüllt</b>	<b>JA</b>
	<b>Leica</b> <b>ADS-40</b>	Flugzeug	<b>Erfüllt</b>	<b>Erfüllt</b>	<b>JA</b>
	<b>GeoEye</b> <b>GeoEye-1</b>	Satellit	<b>Erfüllt</b>	<b>Erfüllt</b>	<b>JA</b>
	<b>GeoEye</b> <b>Ikonos 2</b>	Satellit	<b>Nicht Erfüllt</b>	<b>Erfüllt</b>	<b>NEIN</b>
	<b>DigitalGlobe</b> <b>Quickbird 2</b>	Satellit	<b>Erfüllt</b>	<b>Erfüllt</b>	<b>JA</b>

8.7 Zusammenfassung und Beurteilung der Ergebnisse: Erzeugen von Flughafendatenbanken mittels Methoden der Fernerkundung

Sensor	System	Plattform	Vollständigkeit	Positionsgenauigkeit	Sensor nutzbar zum Generieren von Flughafendatenbanken nach RTCA do-272a Kategorie Medium
	DigitalGlobe <b>WorldView 2</b>	Satellit	Nicht Erfüllt	Erfüllt	NEIN
	ImageSat Int. <b>EROS A</b>	Satellit	Nicht Erfüllt	Erfüllt	NEIN
	ImageSat Int. <b>EROS B</b>	Satellit	Nicht Erfüllt	Kein Angaben	NEIN
	<b>IRS P6</b>	Satellit	Nicht Erfüllt	Keine Angaben	NEIN
	<b>SPOT 5</b>	Satellit	Nicht Erfüllt	Nicht Erfüllt	NEIN
	<b>Landsat 7</b>	Satellit	Nicht Erfüllt	Nicht Erfüllt	NEIN
SAR	Intermap <b>STAR 3i</b>	Flugzeug	Nicht Erfüllt	Erfüllt	NEIN
	Aerosensing <b>AeS-1</b>	Flugzeug	Nicht Erfüllt	Erfüllt	NEIN
	CCRS <b>Radarsat 1</b>	Satellit	Nicht Erfüllt	Nicht Erfüllt	NEIN
	ESA <b>ERS 2</b>	Satellit	Nicht Erfüllt	Nicht Erfüllt	NEIN
	ESA <b>ENVISAT</b>	Satellit	Nicht Erfüllt	Nicht Erfüllt	NEIN
LIDAR	Optech <b>ALTM 3050EA</b>	Flugzeug	Nicht Erfüllt	Erfüllt	NEIN
	Leica <b>ALS50</b>	Flugzeug	Nicht Erfüllt	Erfüllt	NEIN
	Riegl <b>LMS-Q560</b>	Flugzeug	Nicht Erfüllt	Erfüllt	NEIN

Tabelle 49: Sensorsystem-spezifische Zusammenfassung der Ergebnisse bzgl. Vollständigkeit und horizontaler Positionsgenauigkeit

Aus Tabelle 49 ist ersichtlich, dass alle untersuchten flugzeuggestützten chemo- und elektro-optischen Sensorsysteme sowie die satellitengestützten elektro-optischen Sensorsysteme GeoEye-1 und Quickbird-2 sowohl die Anforderungen an Vollständigkeit als auch die horizontale Positionsgenauigkeit zum Erstellen von Flughafendatenbanken nach RTCA Do-272a, Kategorie Medium, erfüllen.

#### **Beurteilung der Ergebnisse:**

Basierend auf den Ergebnissen der Untersuchung kann zusammengefasst werden, dass lediglich flugzeuggestützte chemo-optische Sensorsysteme sowie flugzeuggestützte und höchstauflösende satellitengestützte Sensorsysteme sowohl die Anforderung an Vollständigkeit und horizontale Positionsgenauigkeit erfüllen.

Unter Berücksichtigung der Ergebnisse bzgl. der Verfügbarkeit der verschiedenen Sensorsysteme sowie Kosten und Aufwand zum Erstellen von Flughafendatenbanken mittels der untersuchten Systeme wird zum Erstellen von Flughafendatenbanken nach RTCA Do-272a, Kategorie Medium, die Nutzung des elektro-optischen, satellitengestützten Fernerkundungssensorsystems GeoEye-1 mit direkter Georeferenzierung der Szenen oder alternativ des elektro-optischen, satellitengestützten Fernerkundungssensorsystems Quickbird-2 mit indirekter Georeferenzierung und hierdurch höheren Kosten empfohlen. Sie erfüllen die Anforderungen an Vollständigkeit und horizontale Positionsgenauigkeit und bieten im Vergleich zu den flugzeuggestützten chemo- und elektro-optischen Systemen hohe Verfügbarkeit, geringe Beschaffungskosten und mittleren Aufwand zur Weiterverarbeitung.